

Anotace

Diplomová práce se zabývá principiálním návrhem ohřevu elektrozvlákňovací elektrody. Na tuto elektrodu se přivádí vysoké napětí (desítky kV), které je nezbytnou součástí zařízení pro výrobu nanovláken. V práci je uvedena rešerše možných řešení ohřevu a také jsou rozebrány některé principy výroby nanovláken. Dále jsou v práci uvedeny elektrická schémata a desky plošných spojů modulu ohřevu. Cílem je navrhnout takové řešení ohřevu, aby bylo zvlákňování z taveniny realizovatelné v přístroji pro výrobu nanovláken 4SPIN®.

Klíčová slova

Elektrostatické zvlákňování, zvlákňování z taveniny, přenos tepla, polymer

Abstract

The thesis deals with the principal heating design of the electrospinning electrode. These electrodes are fed with high voltage (tens of kV), which is an essential part of the device for the nanofibres production. This thesis presents the research of possible solutions of the heating and also it analyzes some principles of the nanofibre production. Furthermore, the work presents electrical schematics and PCB of the heating module. The aim of this work is to propose such a solution of heating that makes spinning from melt realizable in the device for 4SPIN® nanofibres production.

Key words

Electrospinning, melt spinning, heating, polymer

Bibliografická citace:

LUKESLE, V. *Modul ohřevu elektrozvlákňovací elektrody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Pokorný, Ph.D., Contipro Biotech s.r.o..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto semestrální práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 29.05.2014

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za účinnou metodickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce. Zároveň také děkuji ostatním kolegům, kteří kontrolovali text práce, poskytli měřicí přístroj nebo věnovali chybějící součástku.

V Brně dne 29.05.2014

podpis autora

Obsah

Úvod	1
1 Teoretický rozbor	2
1.1 Elektrostatické zvlákňování (electrospinning)	2
1.2 Elektrostatické zvlákňování vylepšené o zdroj vyhřátého proudícího vzduchu (electroblowing)	4
1.3 Zvlákňování z taveniny (melt spinning)	5
1.4 Šíření tepla	6
1.4.1 Přenos energie vedením	6
1.4.2 Přenos energie prouděním	6
1.4.3 Přenos energie zářením (sáláním)	7
1.5 Měření teploty	7
1.5.1 Termočlánek	7
1.5.2 Pyrometr	8
1.5.3 Tepelné senzory infračerveného záření	9
1.6 Výpočet výkonu	10
2 Laboratorní techniky zvlákňování z taveniny	12
2.1 Zvlákňování polyetyleny v systému s infračerveným ohřevem	12
2.2 Zvlákňování pro průmyslovou výrobu pomocí laseru	14
3 Návrhy ohřevu	17
3.1 Kondukční způsob	17
3.2 Radiační způsob	18
3.3 Indukční způsob	21
4 Praktické řešení	23
4.1 Časovač NE555	23
4.2 Integrované obvody pro řízení výkonových tranzistorů	24
4.2.1 Integrovaný obvod IR2153	24

4.2.2 Integrovaný obvod SG3524 (SG2524).....	27
4.3 Rezonanční obvody	31
4.4 Schéma zapojení s SG3524	32
4.5 Deska plošných spojů zapojení s SG3524.....	33
4.6 Měření	36
4.7 Další návrhy zapojení pro modul ohřevu	40
4.7.1 Schéma zapojení s IR2153	40
4.7.2 Schéma zapojení s IR2153 v2	42
4.7.3 Rozšíření funkce obvodu s IR2153	43
5 Závěr.....	44
6 Seznam použité literatury	45
7 Seznam příloh.....	47

Seznam obrázků

Obrázek 1. Princip elektrostatického zvlákňování.....	2
Obrázek 2. Ukázka neuspořádané struktury nanovlákn [1].....	3
Obrázek 3. Electroblowing.....	4
Obrázek 4. Zvlákňování z taveniny.....	5
Obrázek 5. Princip termoelektrického článku [9]	7
Obrázek 6. Spektrální intenzita vyzařování černého tělesa [11].....	9
Obrázek 7. Senzor teploty [12]	10
Obrázek 8. Experimentální vysokoteplotní elektrostatické zvlákňování s IR ohřevem [3].....	12
Obrázek 9. Snímky nanovláken získaných SEM [3].....	13
Obrázek 10. Ukázka složeného vlákna PE získaného pomocí IR ohřevu [3]	14
Obrázek 11. Zvlákňování z taveniny pomocí výkonového laseru CO ₂ [4].....	15
Obrázek 12. Detail taveniny a teplotní průběh EVOH materiálu (tloušťka polymerního listu = 0,75 mm, rychlost posuvu = 1 mm / min) [4]	16
Obrázek 13. Příklady vytvořených vláken polyetylen-co-vinylvého alkoholu (EVOH) pro různé tloušťky polymerních listů (rychlost posuvu 0,25 mm / min) [4]	16

Obrázek 14. Principiální ohřev elektrody kontaktním způsobem	17
Obrázek 15. Modul infračerveného laseru o výkonu 2,4 W [13].....	19
Obrázek 16. Ukázka principální metody ohřevu elektrody laserovým paprskem	19
Obrázek 17. Principální blokové schéma laserového ohřevu	20
Obrázek 18. Principální ukázka ohřevu elektrosvláknovací elektrody	21
Obrázek 19. Principiální blokové schéma indukčního ohřevu.....	22
Obrázek 20. Vnitřní blokové zapojení NE555 [14]	23
Obrázek 21. Vnitřní blokové zapojení IR2153 [16].....	25
Obrázek 22. Typické zapojení IR2153 [16]	25
Obrázek 23. Průběhy pro nastavení pracovní frekvence [16]	26
Obrázek 24. Naměřené výstupní signály LO a HO.....	26
Obrázek 25. Teoretické průběhy napětí [16].....	27
Obrázek 26. Vnitřní blokové zapojení SG3524 [17].....	28
Obrázek 27. Průběhy pro nastavení pracovní frekvence [17]	29
Obrázek 28. Výstupní řídicí signály při střídě 15 %	30
Obrázek 29. Výstupní řídicí signály při střídě 60 %	30
Obrázek 30. Výstupní řídicí signály při střídě 90 %	30
Obrázek 31. Zapojení simulovaného rezonančního obvodu	31
Obrázek 32. Kmitočtová charakteristika PRO	31
Obrázek 33. Schéma zapojení s SG3524	32
Obrázek 34. Zhotovená DPS (strana top).....	34
Obrázek 35. Zhotovená DPS (strana bottom)	35
Obrázek 36. Uspořádání pracoviště pro měření modulu ohřevu.....	36
Obrázek 37. Detail měření (střídavý proud PRO=20 A, teplota=150 °C)	37
Obrázek 38. Průběhy řídicích napětí na tranzistorech IGBT (Napětí U_{G1} a U_{G2}).....	38
Obrázek 39. Průběh nárůstu teploty	38
Obrázek 40. Schéma zapojení modulu ohřevu.....	41
Obrázek 41. Průběh napětí na rezonančním obvodu.....	41
Obrázek 42. Schéma zapojení s IR2153 a dvojitou pracovní cívkou.....	42
Obrázek 43. Ukázka praktické realizace dvojitě cívky pro indukční ohřev.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1. Přehled nejdůležitějších parametrů při elektrostatickém zvlákňování [2]	3
Tabulka 2. Normalizované materiálové složení termočlánků [9]	8
Tabulka 3. Naměřené hodnoty (doba ohřevu 4 minuty).....	39

Úvod

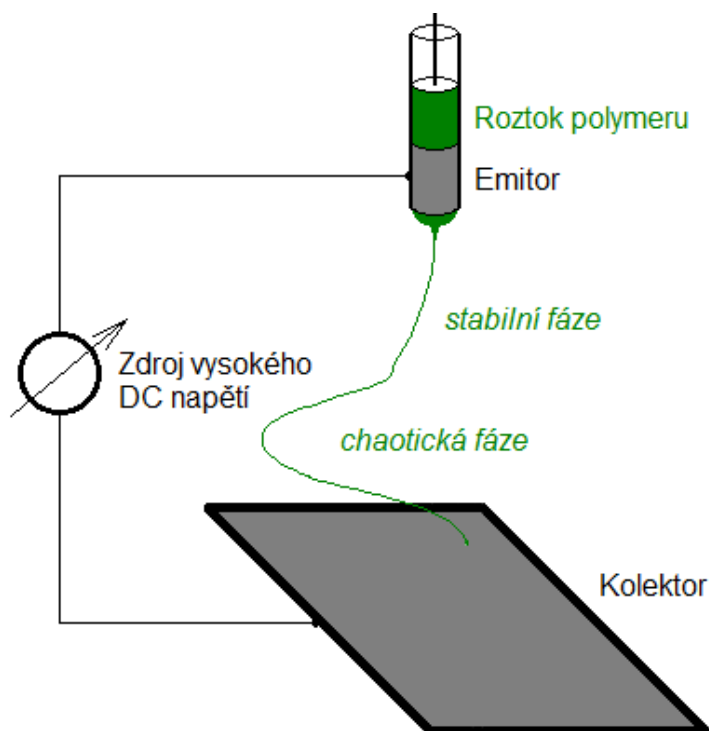
Diplomová práce se zabývá principiálním návrhem a realizací modulu ohřevu pro elektrosvlákňovací elektrodu. Nejprve je v práci rozebrána teorie o svlákňování, o přenosu tepla a o již zavedených způsobech ohřevu v technické praxi. Následují principiální návrhy ohřevu, ze kterých je jeden princip realizován prakticky. Bylo navrženo několik řešení systémů ohřevu včetně elektrických schémat zapojení a desek plošných spojů. Všechny důležité poznatky se nacházejí v textu této diplomové práce.

Modul ohřevu má být konstruován tak, aby byla možná jeho implementace do laboratorního přístroje pro svlákňování 4SPIN. Předpokládá se, že na horní konec trysky bude umístěno malé množství polymerního materiálu ve formě granulátu. Poté se modul ohřevu, společně s řízením elektronikou 4SPINu, postará o zkapalnění daného materiálu a nastane případ svlákňování z taveniny. Svlákňování ovšem potřebuje pro funkci vysoké stejnosměrné napětí. Proto budou při vývoji preferovány bezkontaktní metody ohřevu. Těmi může být laserový paprsek, zářič IR či indukční ohřev, kterému je věnována celá praktická část.

1 Teoretický rozbor

1.1 Elektrostatické zvlákňování (electrospinning)

Nejjednodušší možný princip elektrostatického zvlákňování používaný pro experimentální i průmyslovou výrobu je naznačen na obrázku 1. Zařízení pro elektrostatické zvlákňování je tvořeno emitorem s dutým otvorem (tryska), přes který prochází roztok polymeru ze zásobníku. Tryska s přiváděným polymerem je připojena na zdroj vysokého napětí ($U = 10 - 100 \text{ kV}$). Je zřejmé, že přiváděný roztok polymeru přijímá stejný elektrický náboj, jako má emitor. Na vrcholu trysky se vytvoří kapička polymeru, na kterou působí elektrostatické pole. Pokud dosáhne elektrostatické pole dostatečné intenzity, vznikne rovnováha mezi povrchovým napětím roztoku polymeru a elektrostatickým polem. Další zvýšení elektrostatického pole způsobí jev známý jako Taylorův kužel, což je stav, kdy z kapičky polymeru vlivem silného elektrostatického pole vytryskne směrem k uzemněnému kolektoru tenké vlákno. Další zvýšení elektrostatického pole může ovlivnit dráhu letu vlákna (protažení stabilní fáze letu), ale také ovlivňuje výsledný tvar a jakost nanovlákn. Během cesty prochází vlákno nejprve stabilní fází a poté přejde do chaotické fáze. Také během letu z vrcholu emitor ztrácí nanovlákn rozpouštědla obsažená v roztoku, na kolektor dopadá suché nanovlákn a vytváří neuspořádanou strukturu zobrazenou na Obrázku 2.

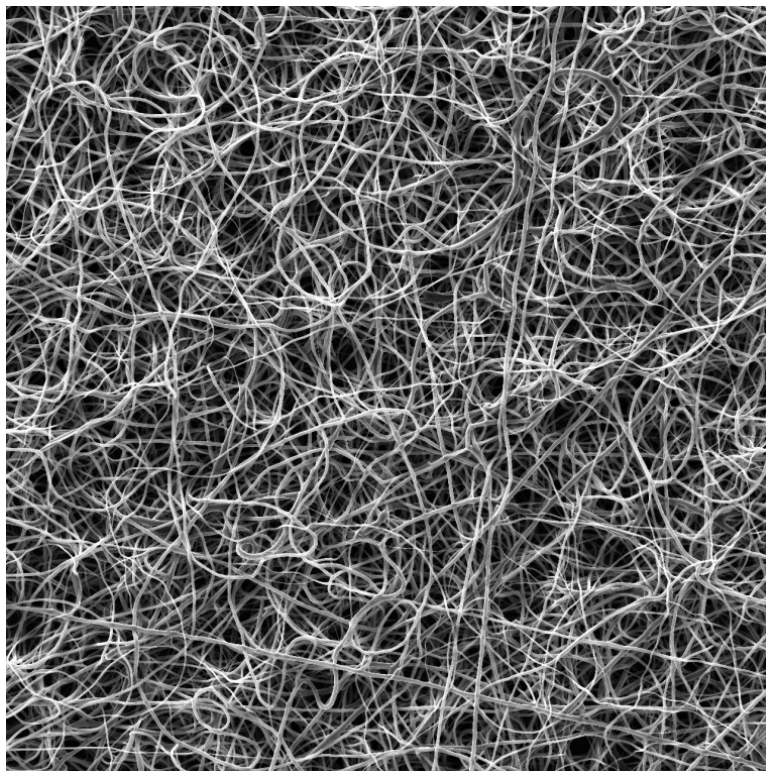


Obrázek 1. Princip elektrostatického zvlákňování

Obdobný princip jako u elektrostatického zvlákňování se využívá u techniky elektrostatického rozprašování (electrospraying). Obecně lze konstatovat, že je v roztoku nižší koncentrace rozpouštědel (nižší viskozita roztoku polymeru). Principiální schéma zůstává stejné jako v případě elektrostatického zvlákňování, avšak vlivem nastavených parametrů se cíleně nevytváří spojitě nanovláknno. Při tvorbě Taylorova kuželu a vytrysknutí nanovláknna se vlákno přerušuje a na kolektor dopadají pouze kapičky polymeru. Jejich velikost bývá od desítek nanometrů až po mikrometry. V tabulce 1. jsou uvedeny nejdůležitější parametry, které ovlivňují proces výroby elektrostatického zvlákňování.

Tabulka 1. Přehled nejdůležitějších parametrů při elektrostatickém zvlákňování [2]

<i>Veličiny a parametry ovlivňující elektrostatické zvlákňování</i>		
Roztok polymeru	Regulovatelné	Okolí
Viskozita	Vzdálenost emitor / kolektor	Teplota
Vodivost	Tvar emitoru a kolektoru	Vlhkost
Povrchové napětí	Gradient elektrostat. pole	Proudění vzduchu
Koncentrace	Rychlost dávkování	Složení atmosféry
Permitivita	Intenzita elektrostat. pole	
Molekulová hmotnost		
Topologie polymeru		

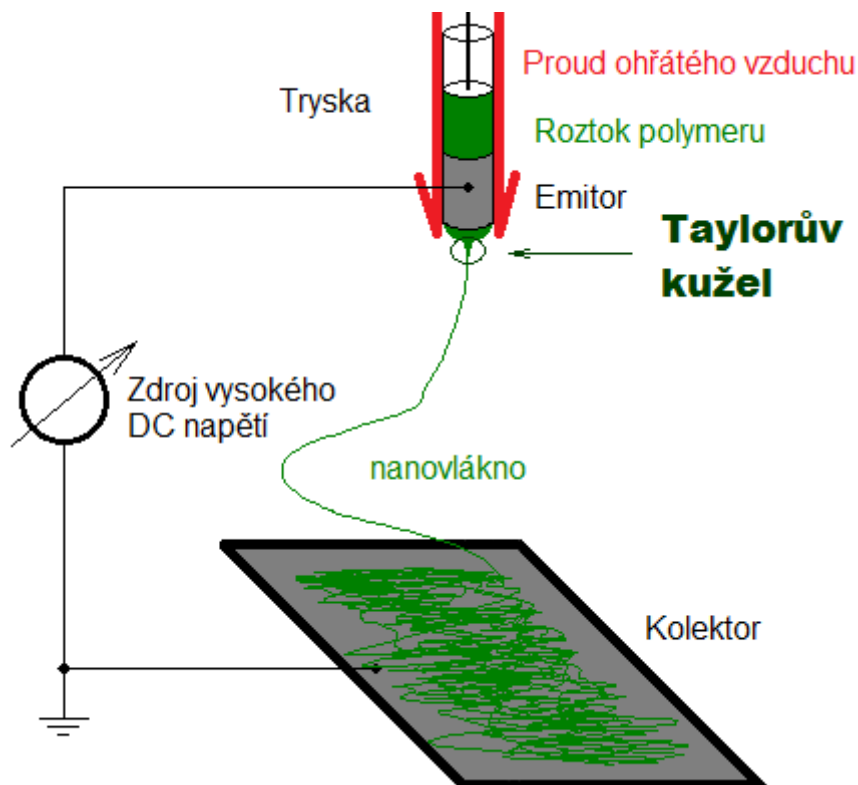


Obrázek 2. Ukázka neuspořádané struktury nanovláknna [1]

1.2 Elektrostatické zvlákňování vylepšené o zdroj vyhřátého proudícího vzduchu (electroblowing)

Pokud je zařízení pro elektrostatické zvlákňování vybaveno speciální tryskou, ve které (nebo kolem které) je umožněno nucené proudění teplého vzduchu, bývá proces účinnější a výsledky zvlákňování lepší (Obrázek 3). Celkově však má proudění ohřátého vzduchu velice příznivé účinky na zvlákňovaný polymer. V blízkosti trysky vznikají ideální klimatické podmínky, které optimalizují i vytvoření Taylorova kuželu. Také se rychleji uvolňují z roztoku polymeru rozpouštědla a i díky tomu lze u některých materiálů i při nižší koncentraci rozpouštědel vytvářet bez-defektní vlákna. Teplota způsobená proudem vzduchu snižuje viskozitu polymerního roztoku a tím výrazně zlepšuje vlastnosti zvlákňovaného vlákna. Touto metodou lze připravovat i většinu biomedicínských polymerních materiálů, protože se například nemusí používat povrchově aktivní toxická rozpouštědla.

U nanovláken se sledují především tyto základní morfologické parametry [2]: průměr vláken, velikost pórů a s tím spojená porozita, uspořádání vláken, typ a výskyt defektů (korálky, slepení, plocha...), celkový tvar a velikost produktu.

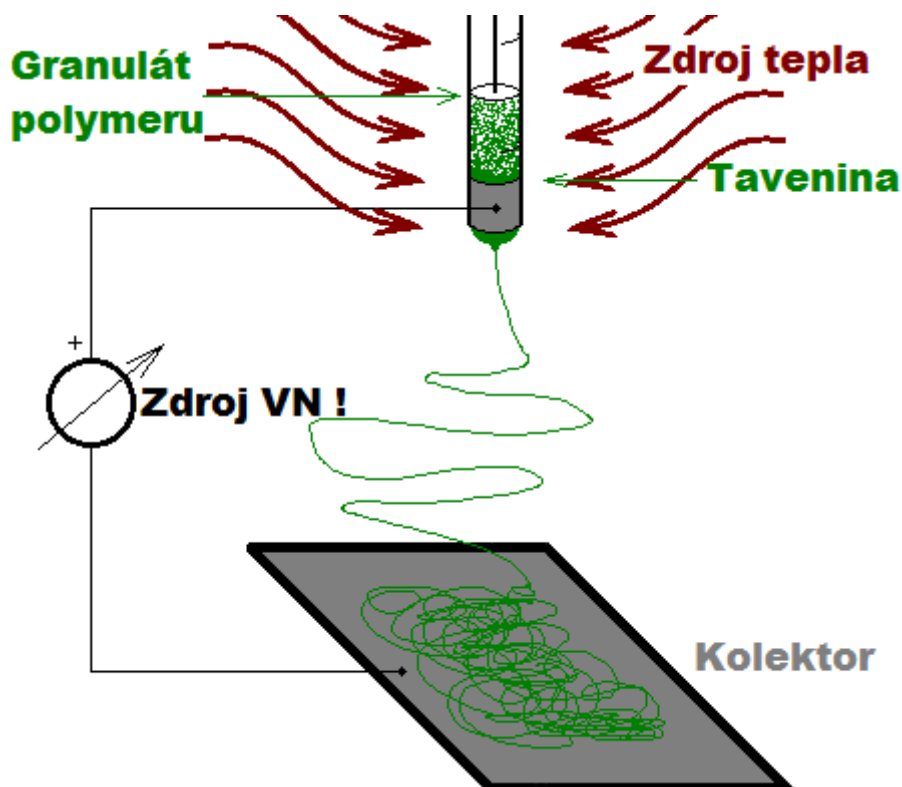


Obrázek 3. Electroblowing

1.3 Zvlákňování z taveniny (melt spinning)

Další důležitou metodou jak vytvářet nanovláknenné struktury je zvlákňování z taveniny polymeru. Možná se tato metoda, zobrazená na obrázku 4, jeví jako electroblowing, ovšem je zde zásadní rozdíl v přípravě základního polymerního materiálu pro zvlákňování. Uvedené metody elektrostatického zvlákňování se mohou různě kombinovat, aby bylo dosaženo příznivých výsledků zvlákňování. Princip zvlákňování z taveniny vychází ze skutečnosti, že surový polymerní materiál má teplotu tání, která je o něco nižší než degradační teplota daného polymerního materiálu.

Základní materiál bývá ve formě granulátu nebo polymerního listu [4] a je ohříván přímo v trysce. Jako ve všech ostatních případech je k vytvoření nanovláken třeba dostatečně silné elektrostatické pole o intenzitě přibližně 100 – 400 kV/m. Po vytrysknutí polymerního vlákna je proces schnutí vázán pouze na teplotu okolí. Vlákno chladne buď vlivem atmosférických parametrů, nebo je jeho jímání uskutečněno v chladící kapalině. Zvlákňování z taveniny má největší výhodu v absenci rozpouštědel nutných k zvlákňování v předešlých případech. Při ohřívání má polymerní materiál tendenci rychle oxidovat, proto se ohřívání provádí zpravidla v ochranné atmosféře [5].



Obrázek 4. Zvlákňování z taveniny

Materiály často zvlákňované touto technikou mohou být například: polyetylen, polypropylen a polystyrene. Také jsou touto metodou připravovány vlákna na bázi polyakátů, které jsou biodegradabilní, což se využívá v medicíně pro výrobu vstřebatelných nití. Tyto materiály mají lepší mechanické vlastnosti a dokonce si částečnou mechanickou pevnost udrží i při navlhnutí. Z výše uvedených důvodů se vlákna používají jako zpevňující nebo jako nosné strukturální prvky. [5]

1.4 Šíření tepla

Termodynamika se zabývá způsoby a podmínkami přeměny tepla v mechanickou práci [6]. Předávání tepelné energie je dle klasické termodynamiky možné dvěma způsoby: vykonáním práce a tepelnou výměnou. V každém případě dochází ke změně teploty vlivem změny části vnitřní energie tepelného systému [6, 7, 8].

Přenosové jevy jsou nevratné procesy, které se projeví transportem různých fyzikálních veličin. Toky veličin jsou vyvolávány gradienty stavových veličin. Transport tepla probíhá po narušení tepelné rovnováhy soustavy. Následují relaxační procesy vedoucí k rovnovážnému stavu. Přenos tepla je možný třemi způsoby a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací) [7].

1.4.1 Přenos energie vedením

Teplu se vedením šíří v látkách všech skupenství. Nejvýraznější je ovšem pro tuhé látky, protože způsob jakým je teplo vedeno, přímo závisí na molekulovém či iontovém pohybu uvnitř látky. Jak do sebe neuspořádané částice narážejí, dochází k přenosu tepelné energie. Přenos tepla samovolně přechází z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Intenzita procesu vedení tepla závisí na maximálním teplotním spádu v daném místě prostředí. Vedení tepla může být neustálené a ustálené (nestacionární a stacionární).

1.4.2 Přenos energie prouděním

K přenosu tepla prouděním dochází pouze u tekutin či plynů (skutečný makroskopický pohyb částic vyvolaný prouděním kapaliny) a to usměrněným pohybem částic. Šíření tepla konvekcí je mnohem účinnější než kondukcí. U konvekčního přenosu tepla rozhoduje také způsob proudění. Rozlišujeme volné proudění, kdy pohyb kapaliny či plynu způsobuje pouze rozdíl v hustotě látky vyvolaný její rozdílnou teplotou a nucené proudění s řádově vyšší účinností. Nucené proudění je vyvoláváno zvenčí například ventilátorem či čerpadlem. Tímto způsobem se nají odvést i velké tepelné objemy (využívá se například pro chlazení výkonových tranzistorů, čipů...).

1.4.3 Přenos energie zářením (sáláním)

Probíhá elektromagnetickým vlněním (proud fotonů), které vyzařuje jakékoli těleso teplejší než 0 K (oscilace elektronů v atomech jsou zdrojem záření). Zároveň ale také každé těleso pohlcuje elektromagnetické záření. Přenos energie zářením je možný i ve vakuu. Tepelné záření podle teploty mění svou vyzařovanou vlnovou délku od infračerveného záření po viditelné spektrum (viditelné záření začíná od teploty povrchu cca 700 K) podle teploty tělesa. Spojité spektrum teplotního záření je možné pouze u kapalin a pevných látek. Jinak na základě kvantové teorie musí být vyzařovaná energie celočíselným násobkem elementární hodnoty kvanta energie. [7]

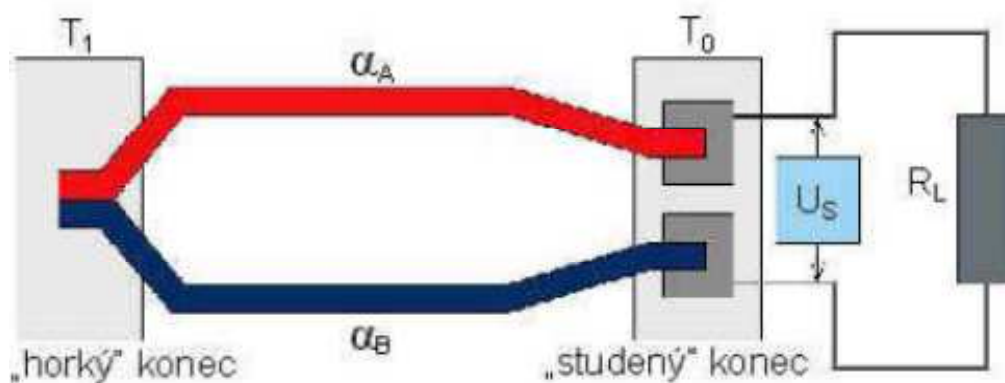
1.5 Měření teploty

1.5.1 Termočlánek

Termoelektrický článek patří do skupiny generátorových senzorů. Vzniká vhodným spojením dvou různých vodivých materiálů. Vodivé spojení je realizované pouze na jednom konci (měřící část T_1) a druhá část je vyvedena do míst s nižší teplotou T_0 . V případě rozpojeného obvodu vzniká na volných koncích termočlánu termoelektrické (Seebeckovo) napětí [9]:

$$U_{EM} = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_1 - T_0) - 0,5 \cdot (\beta_A - \beta_B) \cdot (T_1 - T_2)^2 \quad (1)$$

Kde α_A , α_B , β_A , β_B jsou Seebeckovy koeficienty (termoelektrická síla) materiálů A a B.



Obrázek 5. Princip termoelektrického článku [9]

Termočlány jsou velice používané senzory teploty v praxi. Mezi jejich výhody patří skutečnost, že sami o sobě jsou zdrojem elektrické energie (výstupem je malé napětí (řádově mV) ale jsou poměrně dobrými zdroji proudu). Mají široký teplotní rozsah (-200 °C až

1760 °C), jsou levné, robustní a rychlé. Nevýhodou je výstupní nelinearita, která musí být kompenzována elektronickými obvody. Dále jsou termočlánky vlivem nízkého výstupního napětí citlivé na šum a jejich přesnost není nejlepší (pohybuje se kolem ± 1 °C) [9].

Dle technologických požadavků mohou být termočlánky realizovány jak pomocí tlustých vrstev, tak pomocí tenkých vrstev (na čip).

Tabulka 2. Normalizované materiálové složení termočlánků [9]

Typ	Materiály	Rozsah [°C]	U_t [μV/°C]
E	Chromel / Konstantan	-200 až +900	70
J	Fe / Konstantan	-200 až +750	56
K	Chromel / Alumel	-50 až + 1250	41
R	Pt / Pt + Rh	0 až +1450	11
S	Pt / Pt + Rh	0 až +1450	6
T	Cu / Konstantan	-200 až + 350	42

1.5.2 Pyrometr

Pyrometr je zařízení pro bezdotykové měření teplot povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření mezi tělesem a senzorem záření. Rozsah vlnových délek 0,4 μm až 25 μm odpovídá teplotám od - 40 °C do + 10000 °C. [10]

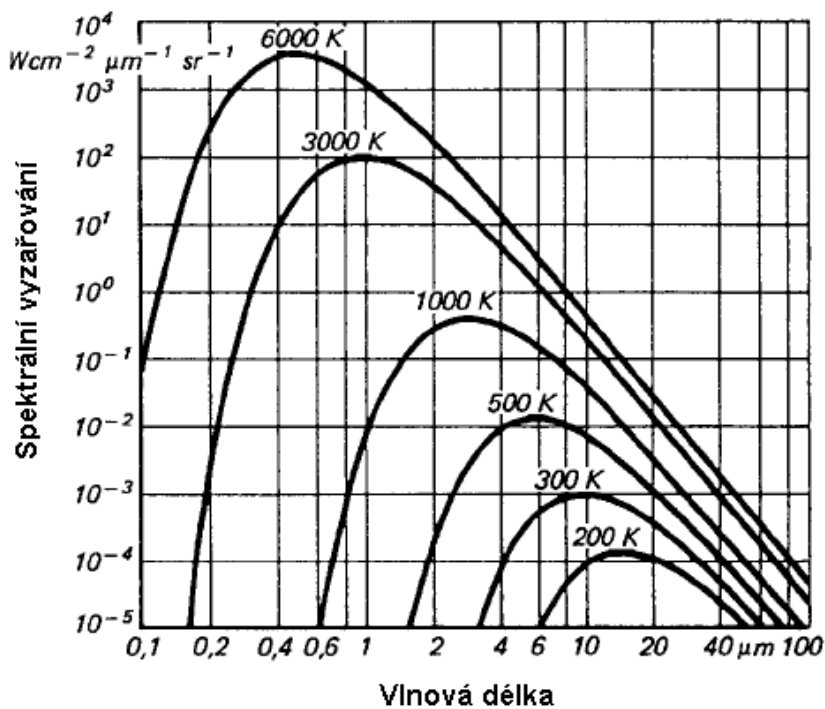
Výhody bezdotykového měření teplot [10]:

- a) minimální vliv měřicí techniky na měřící objekt
- b) možnost měření i pohybujících se těles
- c) možnost měření rychlých teplotních změn
- d) lze snímat a zobrazovat celé povrchy těles (termovize)

Nevýhody bezdotykového měření teplot [10]:

- a) chyba způsobená nepřesným stanovením emisivity měřeného tělesa
- b) chyba způsobená prostupností prostředí
- c) chyba způsobená odraženým zářením z okolního prostředí
- d) závislost na úhlu k měřenému povrchu

Následuje obrázek, který ukazuje spektrální intenzitu vyzařování černého tělesa (Plancův zákon). Z uvedených grafů vyplývá, že spektrální intenzita souvisí s teplotou i s vlnovou délkou záření (pátá mocnina).



Obrázek 6. Spektrální intenzita vyzařování černého tělesa [11]

1.5.3 Tepelné senzory infračerveného záření

Tepelné senzory se vlivem absorbované energie zahřívají (jejich citlivá část) a následně probíhá nepřímé vyhodnocení pohlcené teploty. Nejčastěji se používají termočláňkové baterie (obrázek 7), bolometry a pyroelektrické senzory [10]. Existuje i možnost měření chladnějšího objektu než je samotný detektor, ovšem pak je tepelný tok směřován od senzoru k objektu (ochlazování citlivé části senzoru).

Termočláňkové baterie (thermopile) jsou součástky zhotovené například technikou tenkých vrstev ve vakuovém pouzdru. Vznikají při sériovém řazení termočláňků.



Obrázek 7. Senzor teploty [12]

Pořízený ruční bezdrátový teploměr pro ověřování správné funkce ohřevu disponuje těmito parametry:

BENETECH GM300

- Rozsah teplot $-50\text{ °C} - 380\text{ °C}$ ($\lambda=8 - 14\ \mu\text{m}$)
- Rozlišení $0,1\text{ °C}$
- Měření v cyklu 200 ms
- Emisivita je fixně nastavená na hodnotu $0,95$ (odpovídá tmavému hrubému povrchu)

1.6 Výpočet výkonu

Množství energie pro ohřev tělesa se vypočítá:

$$W = m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad [J, Ws] \quad (2)$$

kde W je energie [J]

m hmotnost tělesa [kg]

c měrná tepelná kapacita [kJ/(kg.K)]

$\Delta \vartheta$ změna teploty [$^{\circ}\text{C}$]

Pro železnou jehlu o váze $0,5\text{ g}$ a změně teploty 100 °C poté vychází:

$$W = 0,0005 \cdot 0,452 \cdot 100 = 0,0226\text{ kJ}$$

Pro železnou trysku o váze 50 g a změně teploty 100 °C:

$$W = 0,05 \cdot 0,452 \cdot 100 = 2,26 \text{ kJ}$$

Potřebný výkon se vypočítá:

$$P = \frac{W}{t} [\text{W}] \quad (3)$$

Kde P je výkon [W]

W energie, práce [J]

t čas [s]

Pro železnou jehlu a dobou ohřevu 30 s potom vychází výkon:

$$P = \frac{22,6}{30} = 0,753 \text{ W}$$

Pro železnou trysku a dobou ohřevu 30 s:

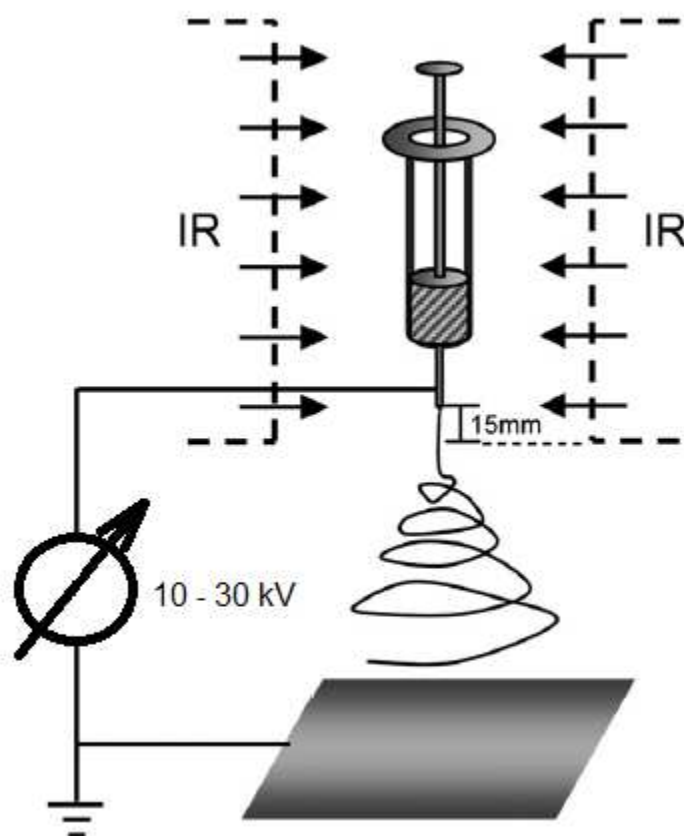
$$P = \frac{2260}{30} = 75,3 \text{ W}$$

Tyto hodnoty jsou teoretické, vlastní výkon celého modulu pro dosažení zvýšení teploty o 100 °C za 30 s bude muset být poněkud vyšší. Železnou trysku o váze zhruba 50 g při praktickém měření nahrazuje šroub M10 x 80 se dvěma maticemi M10. Alternativně se ohřívání demonstrovalo na železném hřebíku o délce 7 cm.

2 Laboratorní techniky zvlákňování z taveniny

2.1 Zvlákňování polyetylenu v systému s infračerveným ohřevem

Skupina japonských a německých vědců (Taiyo Yoshioka, Roland Dersch, Masaki Tsuji, Andreas K. Schaper) zkoumala orientaci vláken získaných z polyetylenu transmisním elektronovým mikroskopem. Jako výchozí materiál byl zvolen granulát polyetylenu, p-xylen a tetrabutylamonium hydrogensulfát (t-BAHS). Kvůli zvýšení elektrické vodivosti se tyto výchozí materiály za občasného mírného míchání zahřívaly na 115 °C po dobu 3 hodin. Poté byla zjištěna koncentrace jednotlivých materiálů a následně se provedlo zvlákňování podle obrázku 8. [3]



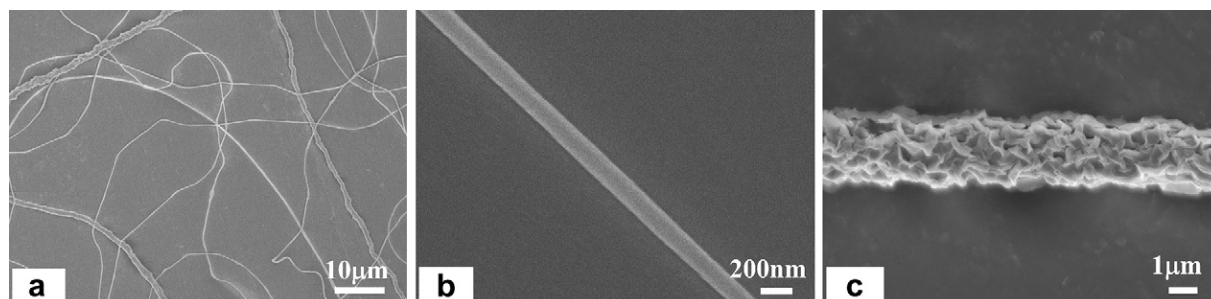
Obrázek 8. Experimentální vysokoteplotní elektrostatičké zvlákňování s IR ohřevem [3]

Za účelem provedení experimentu vysokoteplotního elektrostatičkého zvlákňování bylo použito infračerveného (IR) ohřevu, který je spojen s klasickým konvenčním systémem elektrostatičkého zvlákňování. Systém infračerveného ohřevu disponuje výkonem 500 W. Jak je naznačeno na obrázku 5, systém ohřevu byl umístěn s přesahy po obou stranách skleněné injekční stříkačky s kovovou tryskou. Ta se nachází uprostřed IR emitorů. Velikost každého

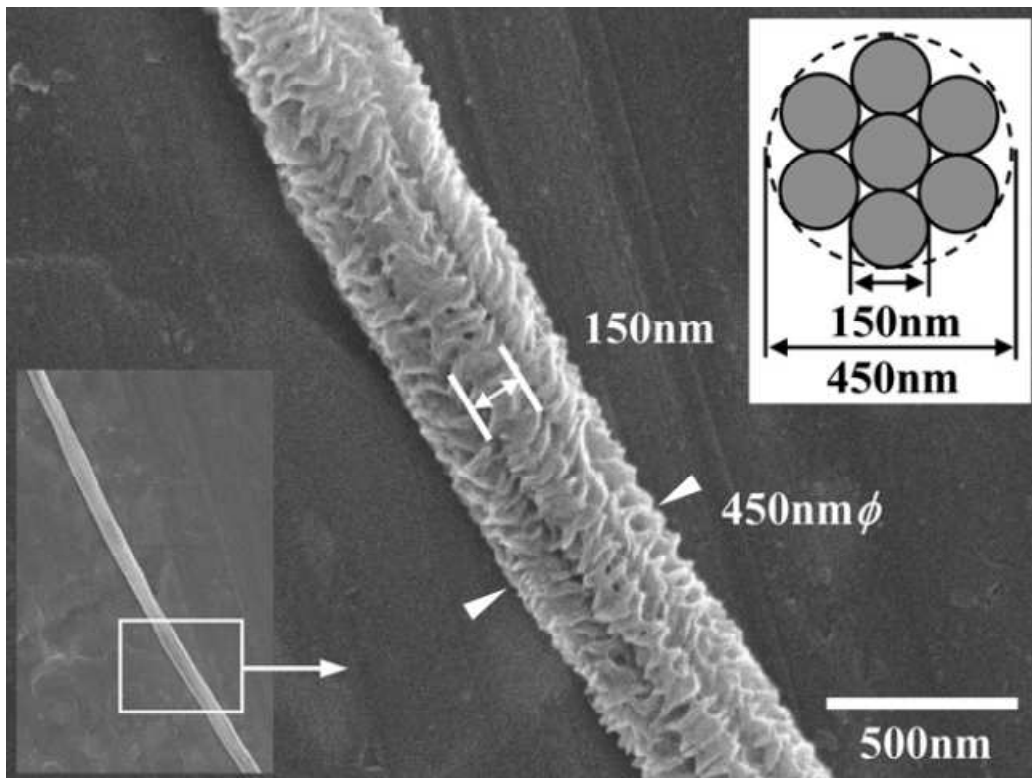
z IR emitorů je 60 x 120 mm. Teplota trysky a injekční stříkačky byla nastavena na 112 °C ±0,5 °C po dobu několika minut během elektrostatického zvlákňování. Rozdíl elektrických potenciálů mezi emitorem a kolektorem se pohyboval mezi 10 kV – 30 kV. Také bylo experimentální zařízení vybaveno regulovatelnou vzdáleností emitoru a kolektoru v rozmezí 100 – 350 mm.

Výsledky experimentů s tímto způsobem elektrostatického zvlákňování byly analyzovány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SAED). Na obrázku 9 jsou zobrazeny příklady vláken polyetylenu (a – typický obraz SEM polymerních PE vláken zvlákňovaných na vzdálenost 300 mm s napětím 25 kV mezi emitorem a hliníkovým kolektorem, b – snímek hladkého vlákna (vzniká při vzdálenosti elektrod větší než 200 mm), c- snímek hrubého povrchu vlákna (při vytváření vláken o průměru větších než 2 μm)). Také byly vytvořeny složená vlákna s hexagonální strukturou (obrázek 7). Během experimentů se objevily i koráلكové defekty v určitých případech. [3]

Bylo odhaleno, že vznik různých struktur vláken závisí především na průměru a morfologii vláken. Současně se povedlo úspěšně vyrobit vlákna s průměrem menším než 150 nm (vysoce orientovaná vlákna obrázek 9b). Vznik hexagonálně orientovaných vlákněných struktur je připisován rozdílům o orientaci ve směru osy vlákna. Zkoumání SEM hrubých až koráلكových vláken prozradilo, že se mění molekulární orientace vlákna. Ta způsobuje jinou strukturu v kapičce než ve vlákně polymeru. Zvlákňování z taveniny roztoku pomocí infračerveného ohřevu se prokázalo jako realizovatelné v praxi. [3]



Obrázek 9. Snímky nanovláken získaných SEM [3]

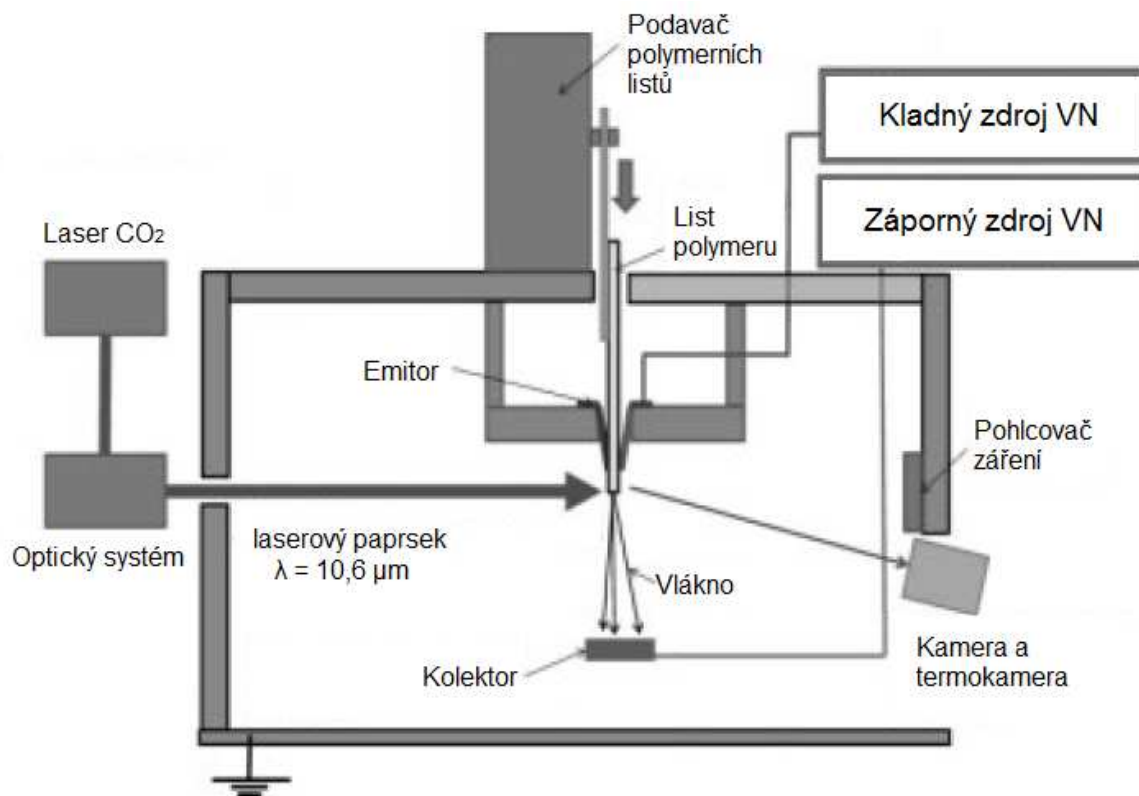


Obrázek 10. Ukázka složeného vlákna PE získaného pomocí IR ohřevu [3]

2.2 Zvlákňování pro průmyslovou výrobu pomocí laseru

Skupina japonských vědců (Naoki Shimada, Hideaki Tsutsumi, Koji Nakane, Takashi Ogihara, Nobuo Ogata) vyvinula nový tavící systém pro hromadnou výrobu nanovláken. Tavící systém je založen na CO₂ laseru o maximálním výkonu 61 W (nominální hodnota výkonu je 50 W). Laser produkuje monochromatický koherentní paprsek, který je pomocí soustavy optických čoček a zrcadel zaostřován na polymerní list. Vlnová délka laseru má hodnotu 10,6 μm (infračervené záření). Tento systém umožňuje vytváření vláken z listů polymerů roztavených laserem v přítomnosti elektrostatického pole. Mechanismus vytváření vláken byl zkoumán vysokorychlostní videokamerou a termokamerou. Principiální schéma se nachází na obrázku 11. [4]

Jako základní materiály byly použity polymerní listy polyetylen-co-vinylového alkoholu (EVOH). Rozměry listů byly 150 x 100 mm a tloušťky 0,5 mm, 0,75 mm a 1 mm. Vzhledem k teplotě tavení 183 °C byl požadavek na udržení teploty taveniny mezi 200 °C – 230 °C (výsledky ovšem dokázaly, že vlivem ohřevu může lokální teplota překročit až 600 °C). Také byl zvlákňován touto metodou nylon 6/12, který má teplotu tavení 218 °C. [4]

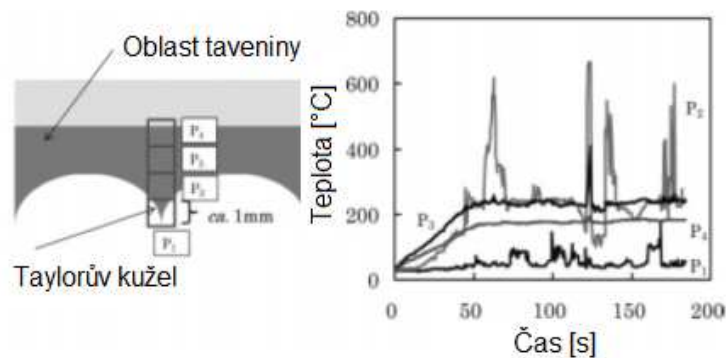


Obrázek 11. Zvlákňování z taveniny pomocí výkonového laseru CO₂ [4]

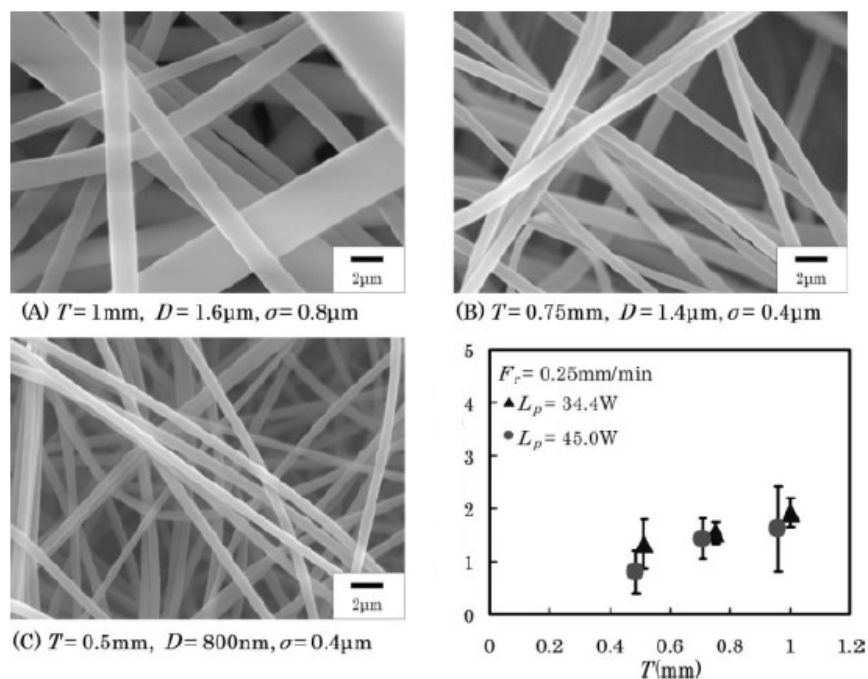
Elektrostatický systém byl vybaven dvěma zdroji vysokého napětí o maximální velikosti napětí 60 kV. Celkový rozdíl potenciálů mezi emitorem a kolektorem dosahuje až 120 kV. Během zvlákňování dosahovala hodnota výkonu laseru typicky 45 W. Vzdálenost emitoru a měděného kolektoru byla nastavena na 100 mm. Na velikost laserové čáry 150 mm lze zaostřit paprsek laseru na méně než 2 mm. V optickém systému, který umožňuje takové možnosti, se nachází soustava zrcadel, optické filtry a kolimátory paprsku. Také je přítomno množství optických čoček umožňující ostření paprsku. Z výstupu optického systému vychází zaostřený laserový paprsek, což je především způsobeno vhodným filtrem. Zařízení obsahuje pohlcovač paprsku, jež utlumí případný laserový paprsek, který by prošel skrz polymerní list. Je to důležité pro bezpečnost, jelikož je infračervené spektrum pro lidské oko neviditelné a třída laseru rozhodně nepatří mezi bezpečné.

Samotný proces zvlákňování byl zkoumán pomocí CCD kamery s vysokým rozlišením a také pomocí termokamery, protože nebyl znám průběh vytváření Taylorových kuželů a s tím spojený proces vytvoření vláken. Obě zařízení se věnovaly oblasti polymerního listu, kde docházelo k tavení polymeru. Výsledek z termokamery naznačuje pravá část obrázku 9.

Bylo zjištěno, že se mnoho Taylorových kuželů (obrázek 12.) vytváří na roztaveném polymerním povrchu v téměř pravidelných intervalech. Jednotlivé vlákno je pak vyrobeno z vrcholu jakéhokoliv Taylorova kuželu. Současně bylo také změřeno, že se teplota v Taylorově kuželu výrazně mění při výrobě vláken (graf v obrázku 12). Kromě toho byl proces zvláknění z taveniny ovlivňován výkonem laseru, velikostí vysokého napětí, tloušťkou listu materiálu a také rychlostí posuvu polymerního listu. Výslednou zvlákněnou strukturu ukazuje obrázek 13.



Obrázek 12. Detail taveniny a teplotní průběh EVOH materiálu (tloušťka polymerního listu = 0,75 mm, rychlost posuvu = 1 mm / min) [4]



Obrázek 13. Příklady vytvořených vláken polyetylen-co-vinylového alkoholu (EVOH) pro různé tloušťky polymerních listů (rychlost posuvu 0,25 mm / min) [4]

3 Návrhy ohřevu

3.1 Kondukční způsob

Nejjednodušší realizace ohřevu elektrody ve tvaru dutého válce (obrázek 14) by bylo navinutí odporového drátku na jehlu (trysku). Pro efektivní využití této metody ohřevu by bylo nutné použít téměř ideálního elektrického izolantu (zároveň ale také ideálního tepelného vodiče) na povrchu odporového drátku (například Konstantanu). Jinak by mohl být proces zvlákňování z taveniny umožněn pouze po elektrickém odpojení napájení ohřevu. Poté přijde na řadu přivedení vysokého napětí na elektrosvláknovací trysku. Během krátkého časového intervalu polymer (či polymerní roztok jak je naznačeno na obrázku 14) chladne a tím se mění vlastnosti pro zvlákňování z taveniny.

Řídící obvod odporového ohřevu lze realizovat velmi jednoduše (napětový či proudový zdroj stejnosměrného napětí), ale i sofistikovaněji pomocí oscilátoru a oddělovacího transformátoru.

Mnohé výhody však nabízí bezkontaktní ohřev, který byl částečně rozebrán v teoretické kapitole. Během procesu elektrosvláknování je důležité umožnit udržovat nastavenou teplotu elektrosvláknovací trysky, stejně jako další velmi důležité parametry. Bezkontaktní ohřev je také vhodný do čistých prostor.



Obrázek 14. Principiální ohřev elektrody kontaktním způsobem

3.2 Radiální způsob

Laserový paprsek je velice výhodný pro provoz v silném elektrostatickém poli, protože proud fotonů nemá žádný vliv na průběh elektrostatického pole. Vlastní laser by bylo výhodné umístit do horní části přístroje 4SPIN. Pro realizaci se může využít laserových modulů, které již disponují optickým systémem. Takový modul reprezentuje například obrázek 15 převzatý z [13]. Jedná se o infračervený laser o vlnové délce 808 nm a výkonu 2,4 W. Tento modul je vybaven potenciometrem pro regulaci výkonu a také TTL logikou pro řízení výkonu. Dále disponuje optikou s možností ostření paprsku, což je velice důležité pro potencionální ohřívání polymerních materiálů v trysce. Směr dopadajících paprsků by měl být pro nejvyšší účinnost ohřevu kolmý. To by bylo zajištěno optickým hranolem nebo zrcadlem uvnitř elektrovlákňovací komory. Vysoký vliv na zahřívanou oblast bude právě přesná fokusace paprsku na elektrovlákňovací trysku.

Vlnová délka laseru určuje hloubku vniku do materiálu. Pro přenos tepla je nejvýhodnější oblast infračerveného spektra (od vlnových délek $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$). Pokud by bylo použito viditelné vlnové délky, výkon laseru by měl být teoreticky vyšší.

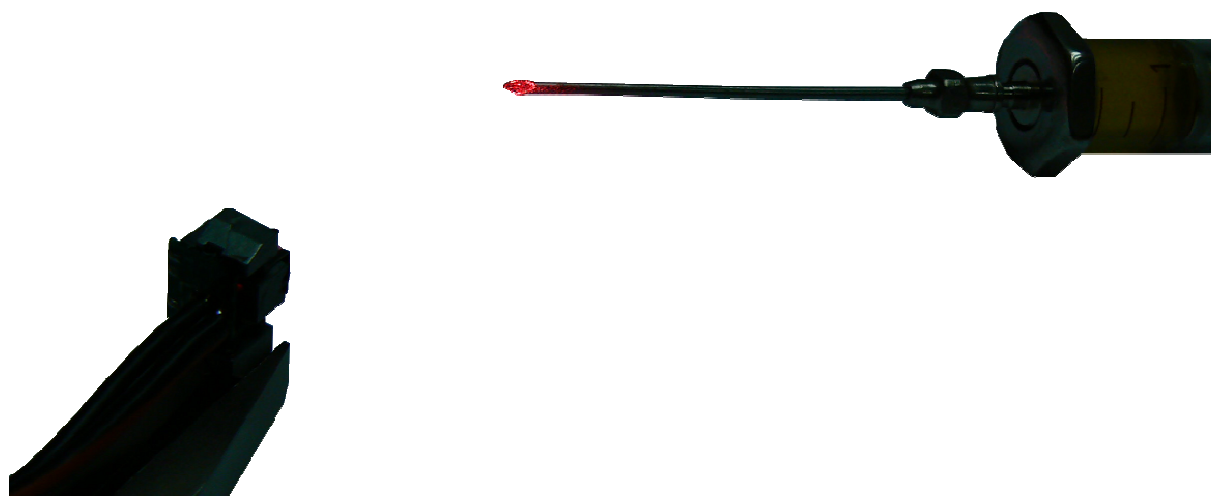
Jako senzor teploty bych zvolil pyrometr. Stejně jako laserový paprsek by musel být dobře zaostřený a nastavený, aby snímal přesnou teplotu. Ta by byla přístrojem 4SPIN (či modulem) využita nejen jako výstupní informace pro obrazovku, ale hlavně jako zpětná vazba pro výkon laseru. Systém by bylo vhodné nastavit tak, že při snímání teploty nebude povrch polymerního materiálu v trysce osvětlován laserem.

Laserový systém má jednu velkou nevýhodu: je třeba používat ochranné pomůcky, přestože zde navrhovaný systém ohřevu produkuje neviditelné záření, při odrazu od stěny trysky by mohlo dojít k trvalému poškození zraku obsluhy.



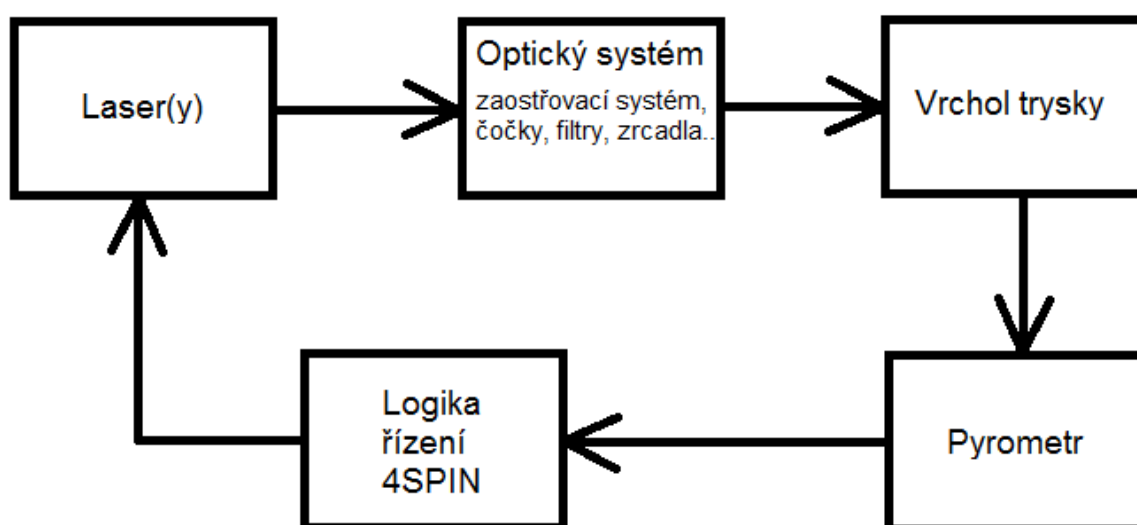
Obrázek 15. Modul infračerveného laseru o výkonu 2,4 W [13]

Experimentální laserový princip ohřevu demonstrováný na obrázku 16 disponuje zdrojem červeného laserového záření. Laserová dioda s filtrem byla napájena 2,3 V ze stejnosměrného laboratorního zdroje napětí. Procházející proud byl kolem 200 mA. Protože laserové diodě chybí čočka, není paprsek dostatečně zaostřen na trysku injekční stříkačky.



Obrázek 16. Ukázka principální metody ohřevu elektrody laserovým paprskem

Na obrázku 17 se nachází blokové schéma uvažovaného laserového ohřevu. Optický systém se nemusí omezovat na jednu vlnovou délku laseru. Bylo by možné vhodně zaimplementovat i červený laserový modul kříže, pro zaměřování středu elektrovlákňovací elektrody. Řízení lze kontrolovat přímo systémem 4SPINu anebo je možno kontrolovat externí elektronikou, skládající se například ze zdroje regulovatelného proudu. Ve zpětné vazbě pro regulaci výkonu rozhoduje také aktuální teplota elektrovlákňovací elektrody (popřípadě přímo zvlákňovaného a taveného polymerního materiálu).

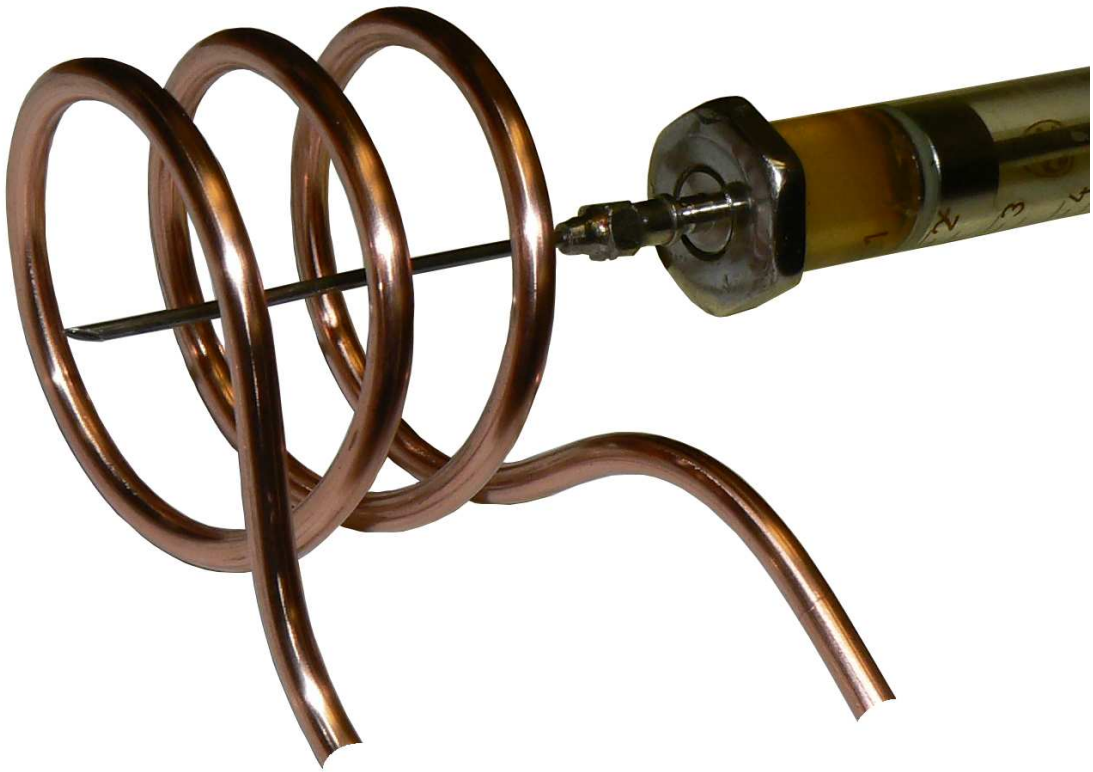


Obrázek 17. Principální blokové schéma laserového ohřevu

Mezi zásadní výhody laserového ohřevu patří pouze lokální omezený ohřev materiálu. S tím souvisí i velice dobrá teoretická účinnost procesu ohřevu. Laserový paprsek nejméně ovlivňuje proces elektrovlákňování i samotný přístroj 4SPIN. Také řízení výkonu (teploty) je při správném nastavení velice přesné.

Mezi nevýhody patří poměrně vysoká pořizovací cena kompletního systému ohřevu. Dále je nevýhoda nutnosti obsluhy používat ochranné pomůcky při zvlákňování. Ochranné brýle by měl mít každý pracovník nacházející se v místnosti. Nastavení optického paprsku a jeho ostření se jeví jako další podstatná nevýhoda při realizaci ohřevu tímto bezdotykovým způsobem.

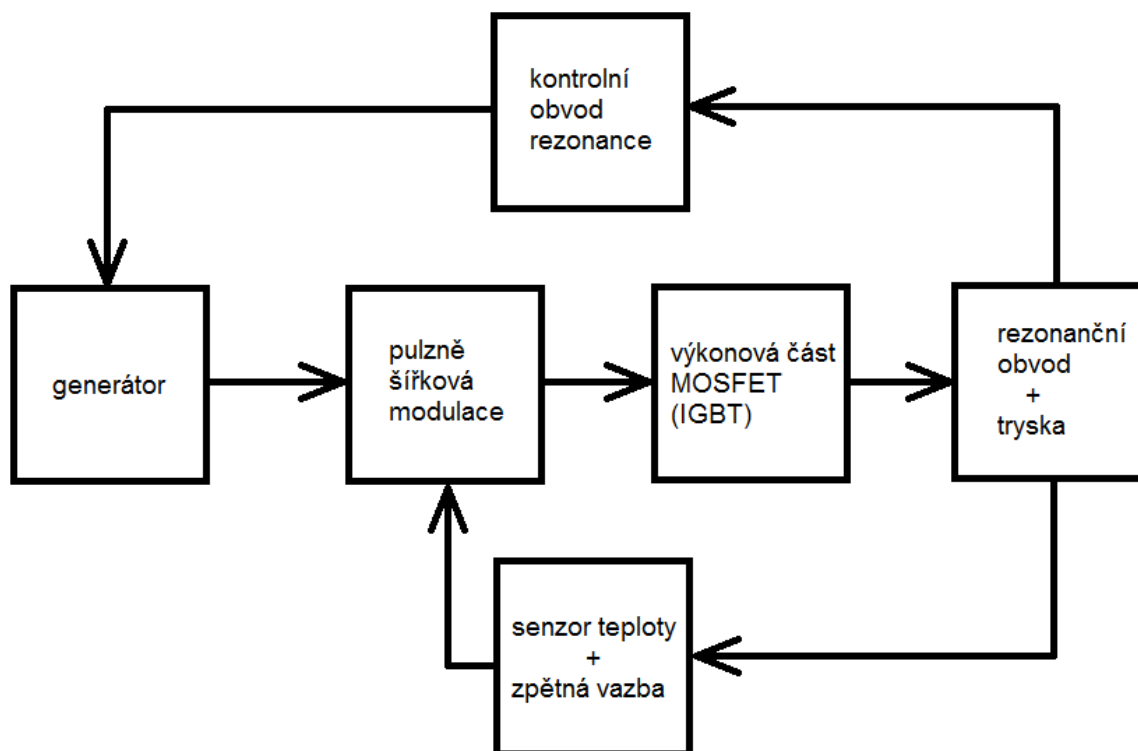
3.3 Indukční způsob



Obrázek 18. Principální ukázka ohřevu elektrosvařovací elektrody

Princip indukčního ohřevu se nejen v průmyslu často využívá (brzdy tramvají, svařování materiálů, příprava pokrmů atd.). Základem ohřevu je rezonanční obvod, kde pracovní cívka představuje primární vinutí transformátoru. Sekundárním vinutím se stává předmět z vhodného materiálu umístěný nejlépe uprostřed pracovní cívky (nejvyšší hustota siločar). Sekundární vinutí má jen jeden závit (smyčka nakrátko). Při buzení rezonančního obvodu rezonančním kmitočtem se v ohřívaném objektu indukují vířivé proudy, které způsobují zvýšení vnitřní energie. Materiál trysky musí být jednak elektricky vodivý a především magneticky vodivý (Fe). Princip indukčního ohřevu zobrazuje obrázek 18. Cívka zobrazená na obrázku 18 má indukčnost $0,3 \mu\text{H}$ při měřící frekvenci 1 kHz.

Ohřev magnetickým polem je velice efektivní. Jedná se také o bezkontaktní metodu ohřevu s vysokou účinností a při správném řízení i dobrými regulačními schopnostmi.



Obrázek 19. Principiální blokové schéma indukčního ohřevu

Obrázek 19 naznačuje principiální blokové zapojení indukčního ohřevu. Základem je generátor sinusového průběhu napětí. Díky zpětné vazbě a obvodům by oscilátor měl být schopen automatické regulace rezonanční frekvence (Thomsonův vztah). Za generátorem následuje obvod využívající pulzně šířkové modulace pro regulaci výkonu. Výkon je kromě nastavené teploty hlídán i elektronikou teploměru. Měření teploty by bylo vhodné realizovat také bezkontaktním způsobem. Výkonová část je zabezpečena oddělovacím (budícím) obvodem pro řízení MOSFET (IGBT) tranzistorů (OZ, optočlen...). Spínací tranzistory mohou být zapojeny jako polomost či úplný most. Inspirací pro zapojení jsou spínané zdroje napětí. Zapojení výkonového stupně jako úplného mostu využívá čtveřici výkonových tranzistorů.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

Kde f_0 je rezonanční frekvence [Hz],
 L indukčnost cívky [H],
 C kapacita kondenzátoru [F].

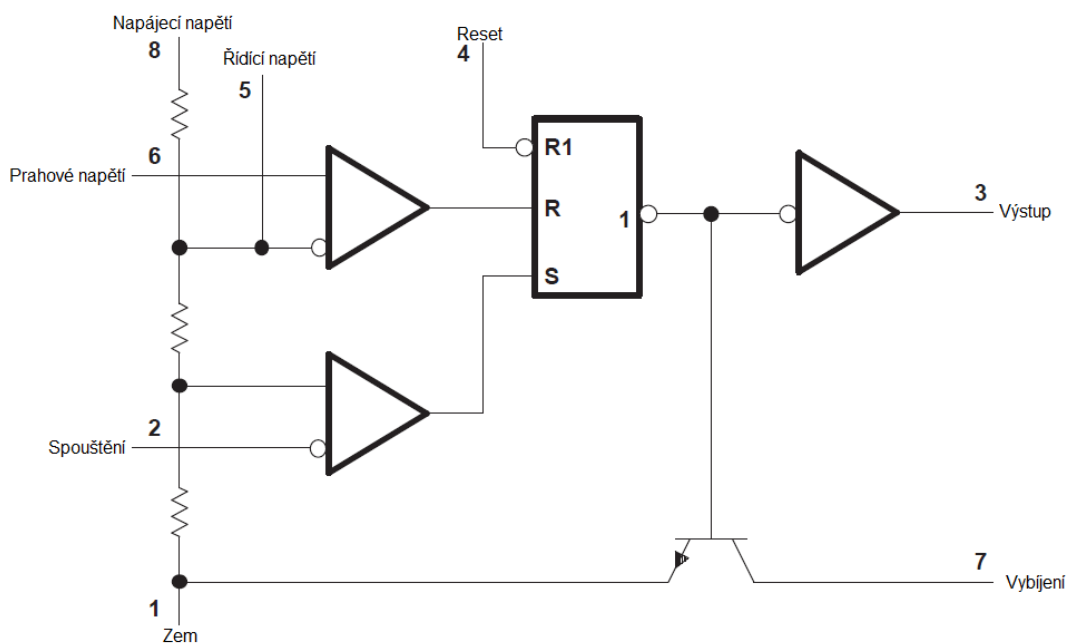
4 Praktické řešení

Při návrhu ohřevu bylo využito několika integrovaných obvodů, kdy nakonec blokové zapojení naznačené na obrázku 19 nebylo realizováno pomocí množství obvodů NE555 [14]. Během studování problematiky bylo nalezeno několik integrovaných obvodů, které disponují všemi nejdůležitějšími funkcemi pro řízení výkonových tranzistorů. Časovače NE555 (či dvojitá verze 556) však naleznou uplatnění pro řízení pulsně šířkové modulace jako rozšíření funkce obvodu při využití integrovaného obvodu IR2153.

4.1 Časovač NE555

Integrovaný obvod NE555 je navržen pro přesné časování. Mezi jeho hlavní aplikace patří monostabilní, astabilní, bistabilní kopné obvody, ale zároveň ho lze využít jako funkční generátor (v zapojení je třeba dvou 555 či jedné 556), generátor pulsně šířkové modulace nebo jiné časové aplikace (zpoždování, sčítání časů a tak dále).

Obrázek 20 ukazuje vnitřní blokové zapojení obvodu 555. Vstupní dvojice komparátorů je připojena na rezistorovou síť. Vstupními signály jsou řídicí napětí (pin 5), reset (pin 4), spouštění (pin 2) a prahové napětí (pin 6). Výstupy komparátorů jsou přiváděny do RS klopného obvodu, který pak řídí výstup a také pomocný výstup vybíjení (pin 7). Výstup (pin 3) je zesílen pomocí invertoru (komplementární CMOS zapojení) [14].



Obrázek 20. Vnitřní blokové zapojení NE555 [14]

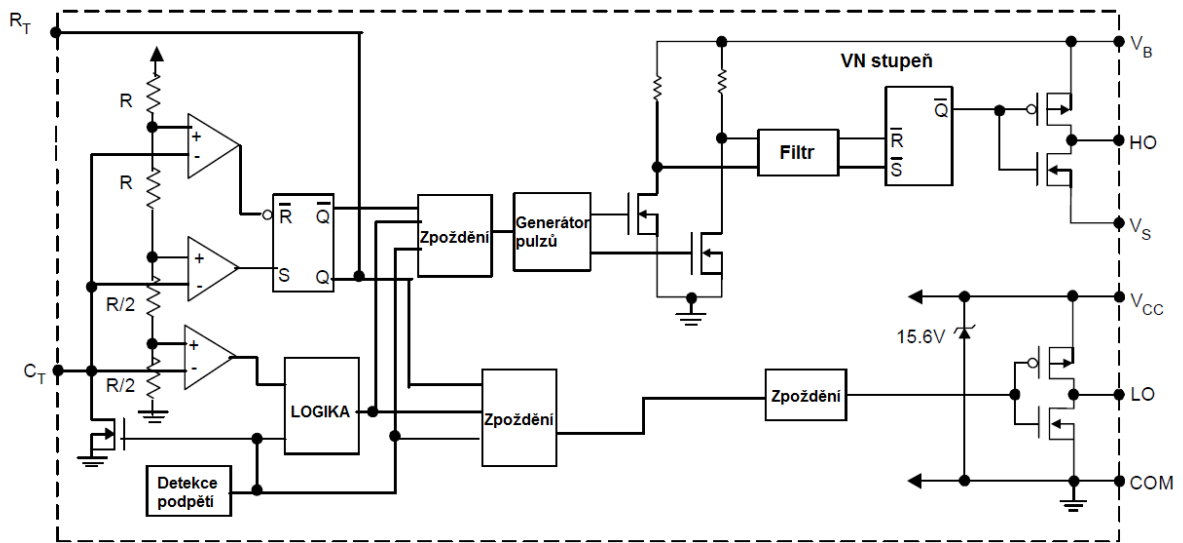
4.2 Integrované obvody pro řízení výkonových tranzistorů

V následujících kapitolách jsou popsány některé monolitické integrované obvody, které slouží pro řízení výkonových tranzistorů ve spínaných aplikacích.

4.2.1 Integrovaný obvod IR2153

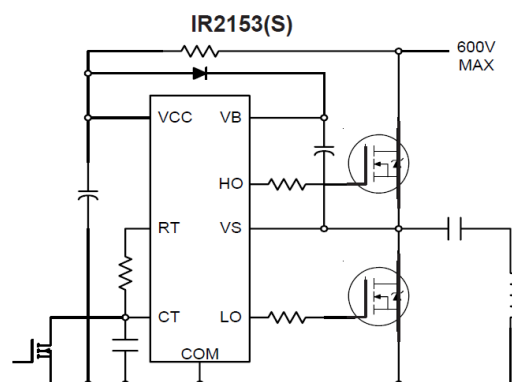
Integrovaný obvod IR2153 od firmy International Rectifier je vylepšenou modifikací řad integrovaných obvodů IR2155 a IR2151 (obsahuje více funkcí a zároveň je jednodušší). Tento obvod je navržen pro řízení pulsních zdrojů v zapojení polovičního mostu. Jde o vysokonapěťový řídicí obvod, kde hlavní oscilátor je podobný průmyslovému standardu CMOS NE555. Vypínání obvodu je možné například unipolárním tranzistorem umístěním na pin C_T . Toto napětí, které je oproti maximálnímu napájecímu nízké, způsobí vypnutí obou výstupů pro MOSFETy. Obvod je také odolnější vůči rušení snížením poměru di/dt , má stabilnější časování při startu a obsahuje ESD ochranu na všech pinech. Mezi základní parametry patří [16]:

- Maximální napětí napájecí výkonové tranzistory je 625 V
- Integrované ochranné 15,6 V Zenerovy diody na Vcc pinu
- Velmi nízký čas spuštění
- Nízký teplotní koeficient kontroly ochranného času (deadtime = 1,2 μ s)
- Zvýšená hysterze až na 1 V
- Konstatní LO a HO pulzy při startu
- Verze IR2153D v sobě zahrnuje integrovanou diodu
- Střída signálu je 50 %
- Doba náběhu a seběhu je 80 a 40 ns

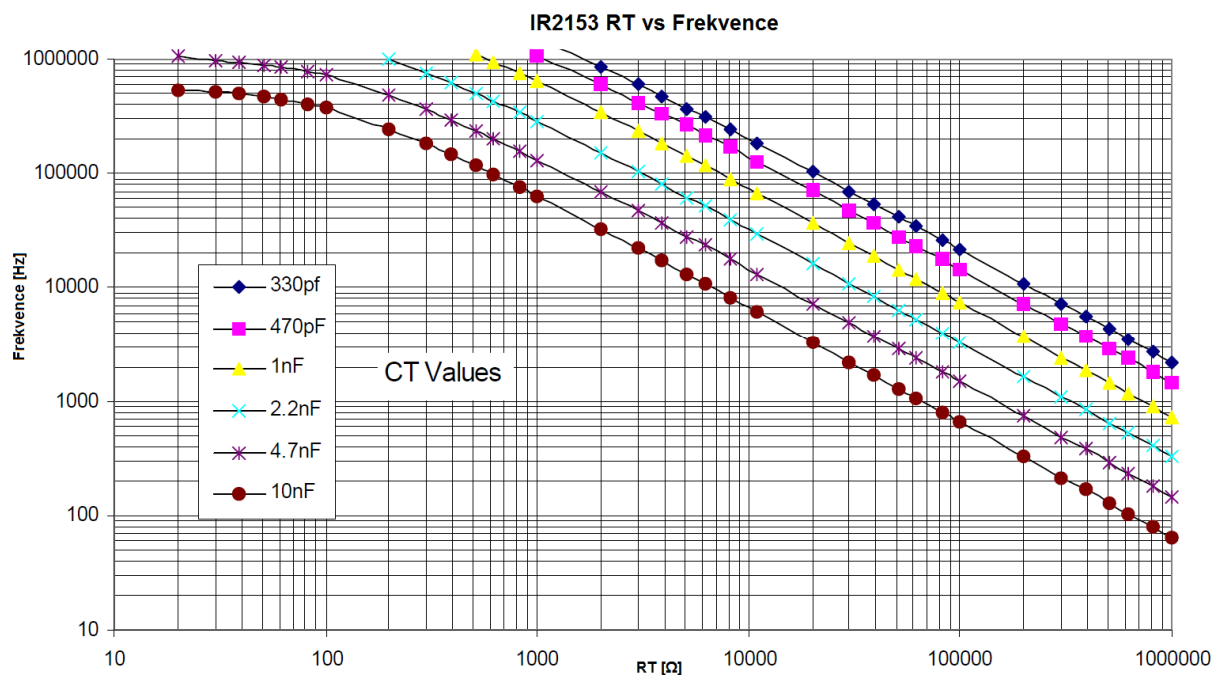


Obrázek 21. Vnitřní blokové zapojení IR2153 [16]

Jak ukazuje obrázek 21, proces nastavení pracovní frekvence vychází ze zapojení časovače 555. Vstupními piny jsou RT a CT které jsou pak spojeny s externími součástkami dle doporučeného zapojení (Obrázek 22). Vstupní komparátory spolu s RS klopným obvodem zajišťují vytváření pracovní frekvence. Další obvody pak k signálu přidávají zpoždovací čas (typicky $1,2 \mu\text{s}$). Dále je přítomen generátor pulsu, který je zesílen (a oddělen) dvojicí NMOS tranzistorů. Signál poté prochází filtrem a výstupním RS klopným obvodem zajišťující obdélníkový signál na výstupu, který je zesílen CMOS výstupním stupněm. Výstupními piny HO a LO jsou řízeny výkonové tranzistory. Typické zapojení podle katalogového listu je níže.

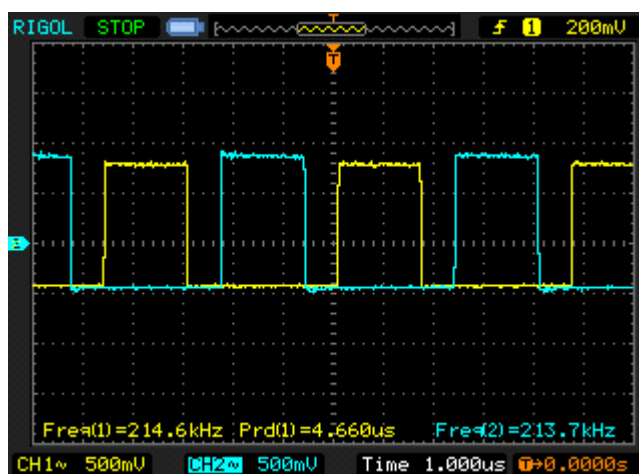


Obrázek 22. Typické zapojení IR2153 [16]



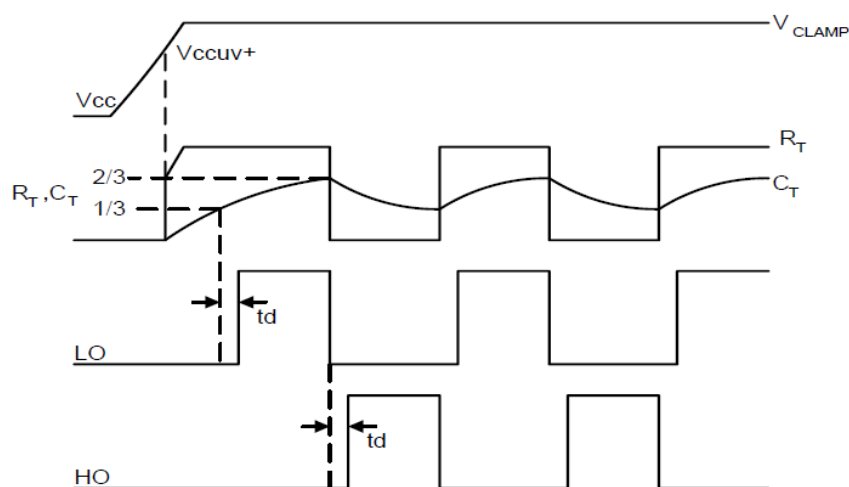
Obrázek 23. Průběhy pro nastavení pracovní frekvence [16]

Obrázek 23 zobrazuje průběhy frekvence v závislosti na použitém časovacím kondenzátoru CT a rezistoru RT. Díky těmto průběhům je možné vhodnou volbou součástek nastavit přibližně pracovní frekvenci. Výrobce udává doporučené minimální hodnoty součástek CT (min. 330 pF) a RT (min. 10 kΩ). Při použití minimálních hodnot dosahuje pracovní frekvence řídicích signálů 214 kHz, jak bylo ověřeno pomocí osciloskopu (Obrázek 24). Realizovaná zapojení využívá nižších frekvencí.



Obrázek 24. Naměřené výstupní signály LO a HO

Teoretické průběhy ukazuje obrázek 25, který zároveň zobrazuje průběhy na časovacím kondenzátoru C_T a rezistoru R_T . Z uvedených průběhů vyplývá funkce časového zpoždění (na obrázku t_d). Jakmile napětí na C_T překročí hodnotu $1/3$, dojde až po překročení času $1,2 \mu\text{s}$ k aktivaci výstupu LO. Stejně jako při aktivaci výstupu HO (napětí na C_T je na hodnotě $2/3$). Tato doba je důležitá pro správnou funkci výstupních tranzistorů v obvodu, aby bylo vždy zaručeno, že se daný tranzistor dostane do stavu, kdy jím už neprotéká proud (tranzistor je uzavřen). Je zřejmé, že naměřené hodnoty odpovídají předpokládaným teoretickým hodnotám.



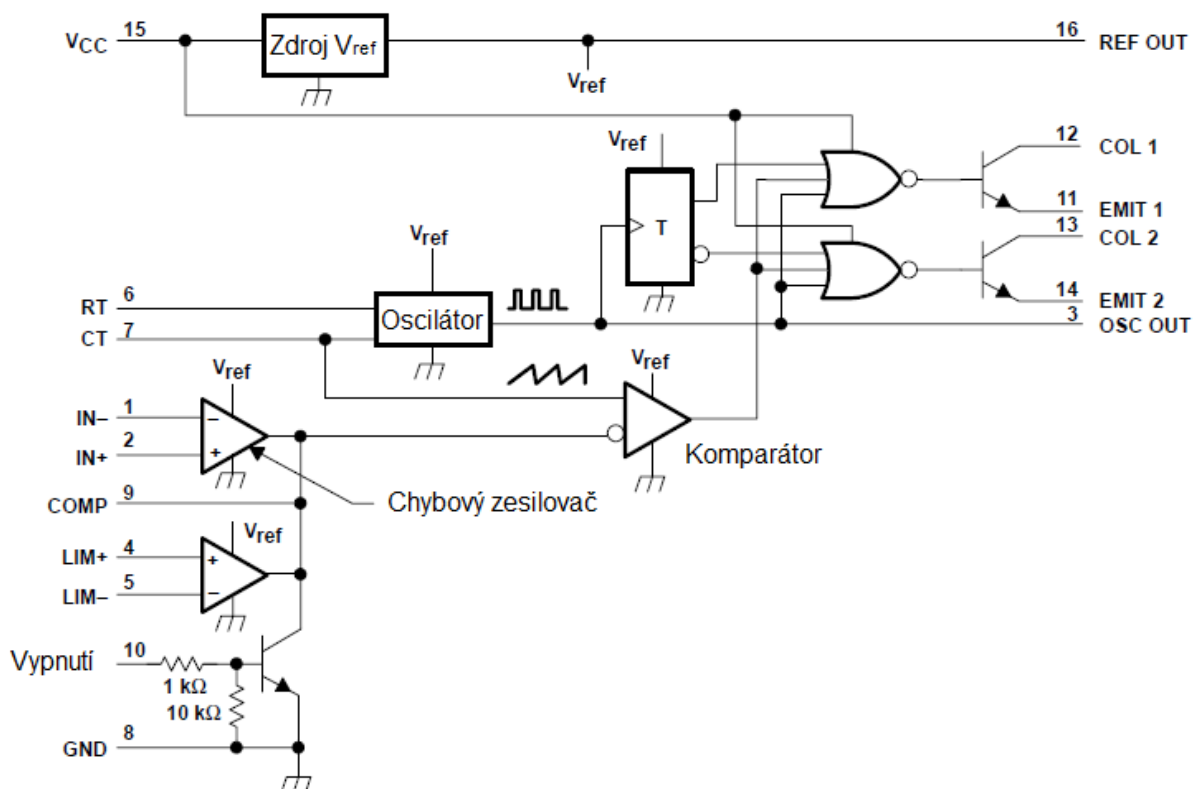
Obrázek 25. Teoretické průběhy napětí [16]

4.2.2 Integrovaný obvod SG3524 (SG2524)

Integrovaný obvod SG3524 (či SG2524) je navržen pro aplikace spínaných zdrojů, DC-DC měničů, transformátorových měničů, násobičů napětí a jiných aplikací. Mezi jeho přednosti patří možnost regulace pomocí pulsně šířkové modulace na pevné frekvenci. Ta je nastavena jedním časovacím kondenzátorem C_T a časovacím rezistorem R_T . Rezistor R_T zavádí nabíjecí proud pro C_T . To má za následek pilovitý průběh napětí, které je přiváděno do komparátoru. Tím je zabezpečena lineární kontrola trvání výstupního pulzu v závislosti na chybovém zesilovači. SG3524 obsahuje vnitřní zdroj referenčního napětí $U_{ref} = 5 \text{ V}$, který slouží nejen pro interní komparátory, ale dá se využít i pro externí reference. Externí referencí může být rezistorová síť, kde výstup ovládá v běžném režimu rozsah chybového zesilovače. Výstup je pak zesílen a porovnán v komparátoru. Výsledný modulovaný impuls

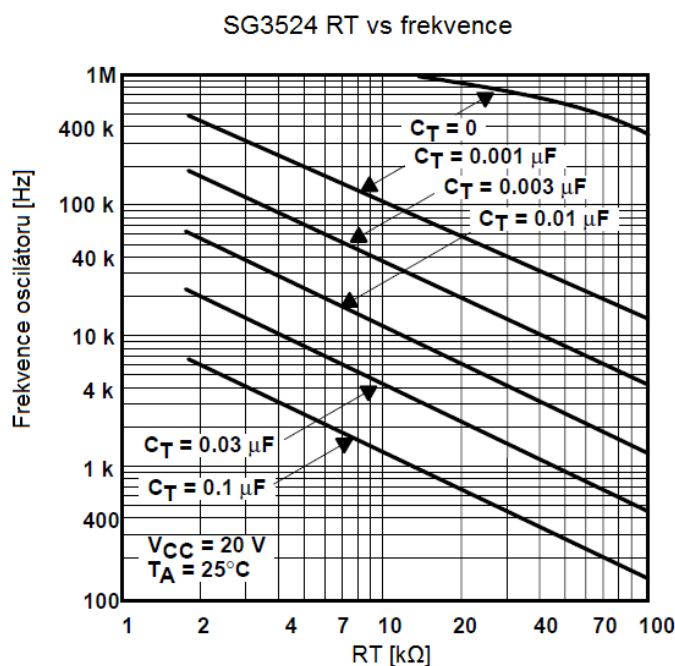
z komparátoru je pak pomocí hradel přiveden na výstupní tranzistor (T1 nebo T2) a pomocí pulsního řízení oscilátor synchronně přepíná výstupy. Oscilátor výstupního pulsu slouží rovněž jako zaslepovací impuls, který řídí čas zpoždění výstupu. Doba zpoždění je řízena hodnotou CT. Výstupy mohou být v konfiguraci push-pull, kdy je v činnosti vždy jen jeden z tranzistorů nebo mohou být výstupy zapojeny paralelně, při využívání jediného výstupního výkonového tranzistoru. Frekvence spínání je stejná jako u oscilátoru. Výstup chybového zesilovače sdílí společný vstup do komparátoru s obvody omezující proud (piny 4 a 5). Tento společný uzel je připojen přes pin COMP (pin 9), který může být použit pro řízení omezení proudu nebo ho nahradit. Současně může být tento pin použit pro další kontrolu regulátoru. Toto popsané vnitřní zapojení je na obrázku 26. Konkrétní zapojení je uvedeno dále v samostatné kapitole. Mezi základní parametry patří [17]:

- Napájecí napětí maximálně 40 V
- Maximální referenční proud 50 mA
- Nízký klidový odběr 8 mA (ověřeno měřením)
- Rozsah pracovních frekvencí od 130 Hz – 722 kHz
- Zaměnitelnost obvodů SG3524 za SG2524
- Kompletní řízení pulzně šířkovou modulací pro výkonové zapojení



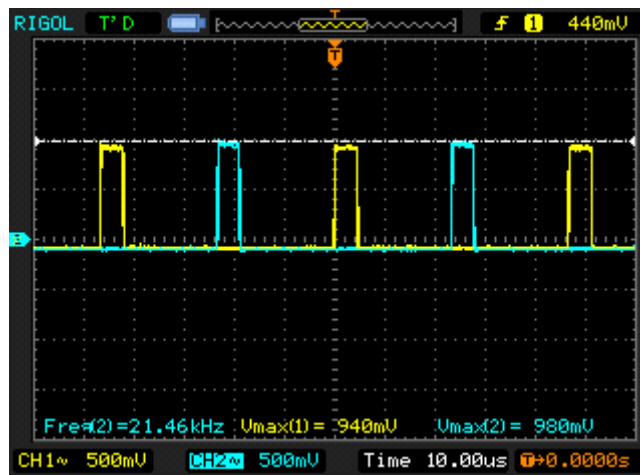
Obrázek 26. Vnitřní blokové zapojení SG3524 [17]

Obrázek 27 zobrazuje průběhy při použití různých časovacích hodnot součástek. I zde výrobce udává minimální a maximální hodnoty součástek. Doporučený rozsah kapacit pro časovací kondenzátor C_T je od 1 nF po 100 nF. Hodnoty pro rezistory R_T jsou od 1,8 k Ω do 100 k Ω .

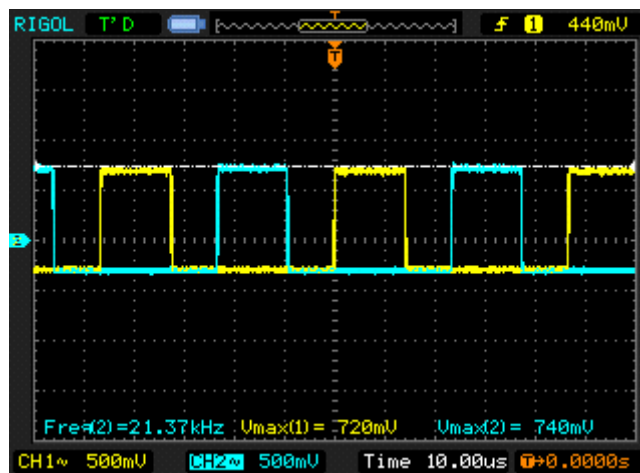


Obrázek 27. Průběhy pro nastavení pracovní frekvence [17]

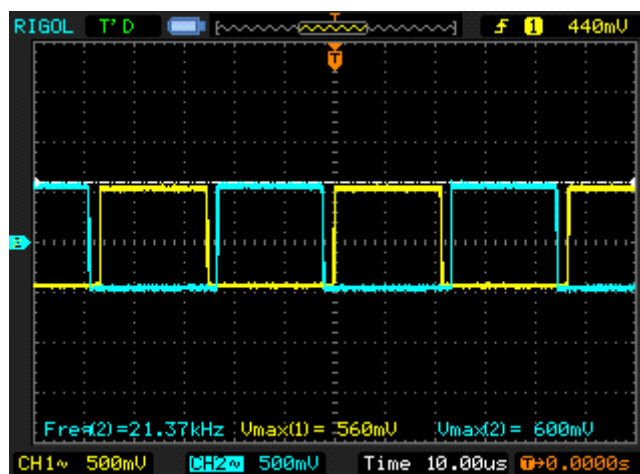
Výstupní průběhy napětí byly ověřeny pomocí osciloskopu. Z níže uvedených průběhů vyplývá i princip regulace pulsně šířkovou modulací (v zapojení se nachází potenciometr, který svojí polohou jezdce určuje hodnotu střídavy výstupních signálů). Obrázky 28 – 30 zobrazují naměřené průběhy konkrétního zapojení při napájení 12 V stejnosměrným zdrojem bez osazených výstupních tranzistorů. Sondy osciloskopu pracovaly s nastavením 1 / 10, takže výsledné výstupní napětí, které řídí výkonové MOSFET či IGBT tranzistory, je desetinásobkem uváděné hodnoty. Průběhy jsou také důkazem, že existuje malý rozptyl okolo nastavené frekvence a proto je vhodné její co možná nejpřesnější naladění. Zapojení bylo doporučené testovací zapojení z katalogového listu [17] (nachází se v příloze E). Jednalo se o osazenou desku plošných spojů bez výkonových tranzistorů a rezonančního obvodu.



Obrázek 28. Výstupní řídicí signály při střídě 15 %



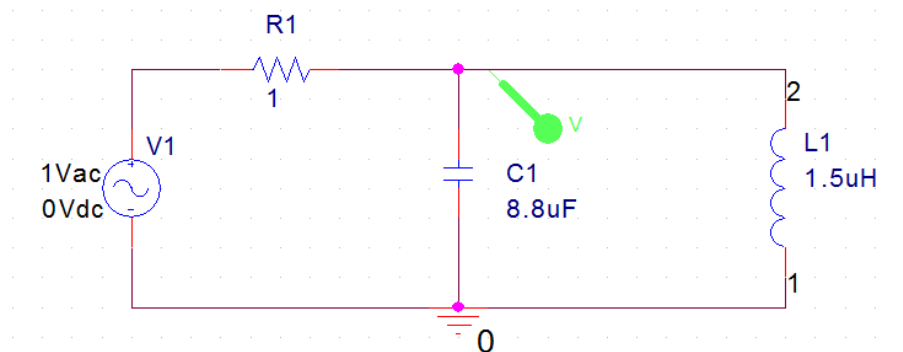
Obrázek 29. Výstupní řídicí signály při střídě 60 %



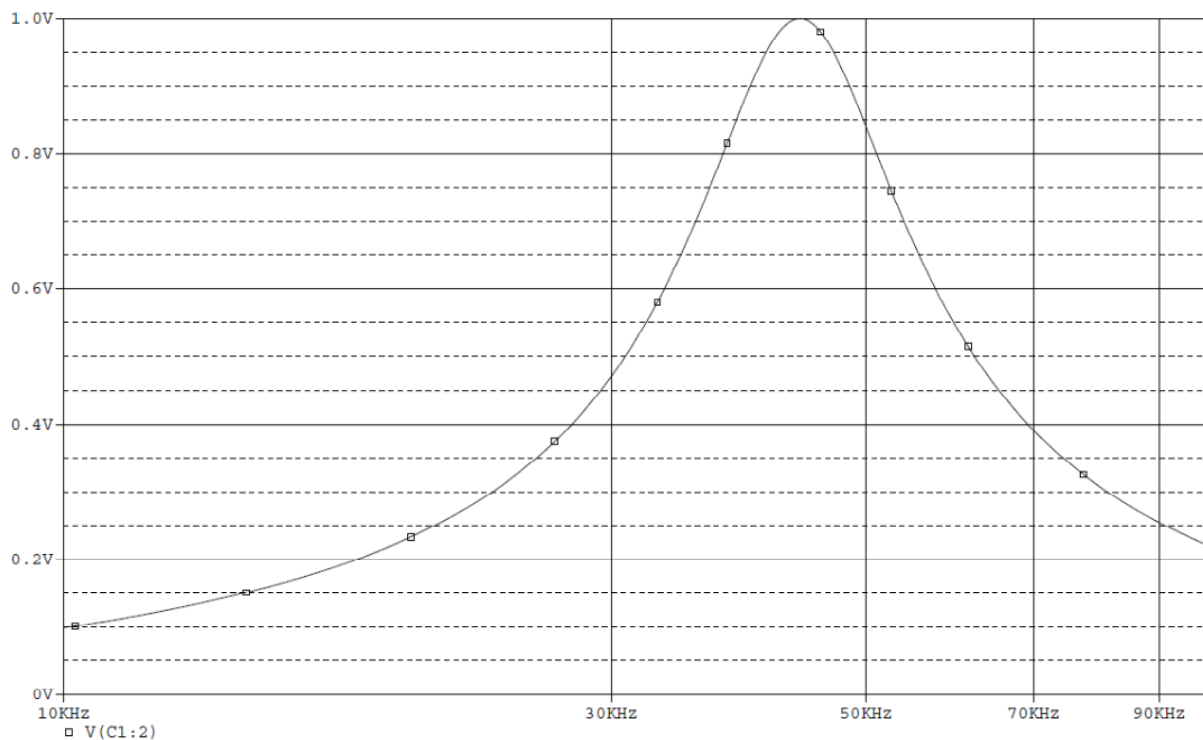
Obrázek 30. Výstupní řídicí signály při střídě 90 %

4.3 Rezonanční obvody

Jak již bylo naznačeno, pro správnou funkci indukčního ohřevu je důležité mít naladěný rezonanční obvod. Jak je zobrazeno na obrázku 31, rezonanční obvod se skládá z kondenzátoru a cívky. Jedná se o paralelní rezonanční obvod, kdy při naladění rezonančního kmitočtu je napětí nejvyšší a také proud procházející rezonančním obvodem má maximální hodnotu. Průběh získaný simulací je zobrazen na obrázku 32. Jako zdroj signálu slouží střídavý zdroj harmonického signálu. Ze simulace vyplývá rezonanční frekvence $f_0=43,853$ kHz. Výpočet podle Thomsonova vztahu vychází pro dané hodnoty $f_0=43,805$ kHz.



Obrázek 31. Zapojení simulovaného rezonančního obvodu



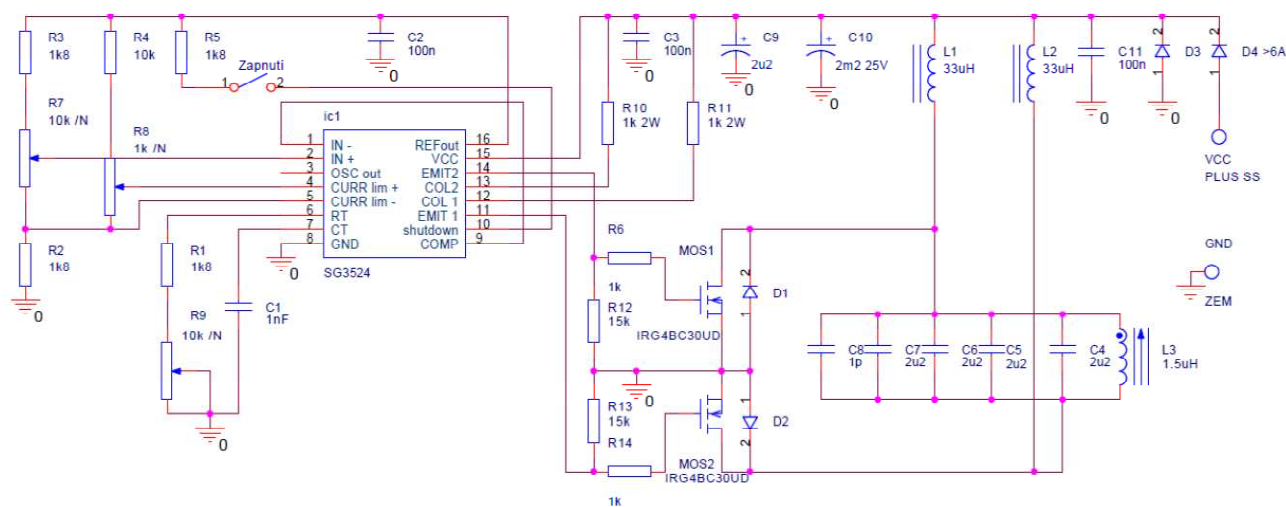
Obrázek 32. Kmitočtová charakteristika PRO

4.4 Schéma zapojení s SG3524

Na obrázku 33 se nachází schéma zapojení indukčního ohřevu založené na řídicím obvodu SG3524. Inspirací pro principiální zapojení rezonančního obvodu, aniž by byl spojen se zemí, bylo schéma dostupné na internetových stránkách [18]. Pomocí simulací bylo zjištěno, že tlumivky L1 a L2 přivádějí stejnosměrné napájecí napětí do rezonančního obvodu téměř neovlivňují rezonanční frekvenci, ale maximální hodnoty napětí a proudů při rezonanci.

Časovací kondenzátor CT je ve schématu označen jako C1 a má hodnotu 1 nF. Rezistor RT v zapojení nahrazuje sériové zapojení předřadného odpor R1 o velikosti 1k Ω s potenciometrem o velikosti 10 k Ω . Tímto zapojením je zabezpečena minimální hodnota časovacího rezistoru a zároveň lze frekvenci přeladovat při případné výměně pracovní indukčnosti L3. Proudové omezení je nastavitelné potenciometrem R8. Průběhy na osciloskopu však v tomto zapojení ukázaly pouze omezenou možnost nastavení limitu a proto jeho případné vynechání z obvodu nemá zásadní vliv na funkci. Pulsně šířková modulace je regulovatelná potenciometrem R7. Vhodným nastavením lze docílit buď pozvolného, nebo rychlého ohřívání trysky.

Výstupní výkonová část zapojení začíná přivedením napájecího napětí do obvodu SG3524. Napájecí napětí je také dodáváno přes rezistory R10 a R11, které slouží pro napájení výstupních tranzistorů. Řídící výstupy pro výkonové tranzistory se nacházejí na pinech 11 a 14. Výstupní obdélníkový signál poté prochází odpory R12 a R13 proti zemi. Stejný úbytek napětí pak řídí výkonové tranzistory MOS1 a MOS2.



Obrázek 33. Schéma zapojení s SG3524

V tomto případě se jedná o IGBT tranzistory IRG4BC30UD [19], které mají na čipu integrovanou diodu (v zapojení jak je zobrazeno ve schématu). Proto diody D1 a D2 nemusí být osazeny.

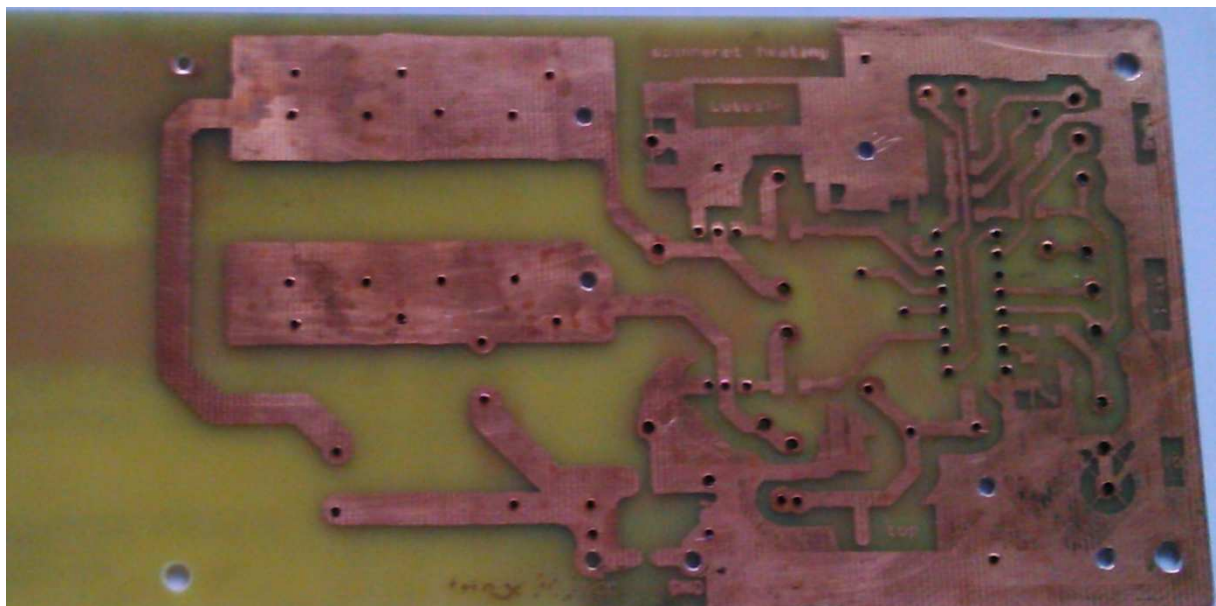
Rezonanční obvod je sestaven z několika kondenzátorů, aby byl procházející proud rozložen a nedocházelo k nadměrnému namáhání kondenzátoru. Zároveň se tím snižuje vnitřní odpor, tudíž je vyšší jakost rezonančního obvodu. Paralelní zapojení svitkových kondenzátorů o velikosti 2,2 μF čítá čtyři kusy. Výsledná kapacita je tedy přibližně 8,8 μF . Ohřívací cívka je v tomto případě opatřena trojitou izolací (vzhledem k vysokému napětí přiváděného na ohřivanou elektrodu) a má 6 závitů. Tato cívka je vyrobena z měděného drátu o průřezu 10 mm^2 . Vnitřní průměr cívky je 35 mm a její indukčnost je 1,5 μH při měřicí frekvenci 10 kHz.

V zapojení se nachází množství keramických blokovacích kondenzátorů v SMD provedení o velikosti 1206 a hodnotě 100 nF (C2, C3 a C11). Dále je v zapojení elektrolytický kondenzátor o hodnotě 2,2 mF, který slouží pro vyplňování proudových špiček. Napájecí napětí typicky o hodnotě 24 V prochází přes usměrňovací diodu D4, která obvod chrání jednak před přepólováním (také dioda D3) a jednak chrání zdroj před naindukovaným napětím, které způsobují tlumivky L1 a L2.

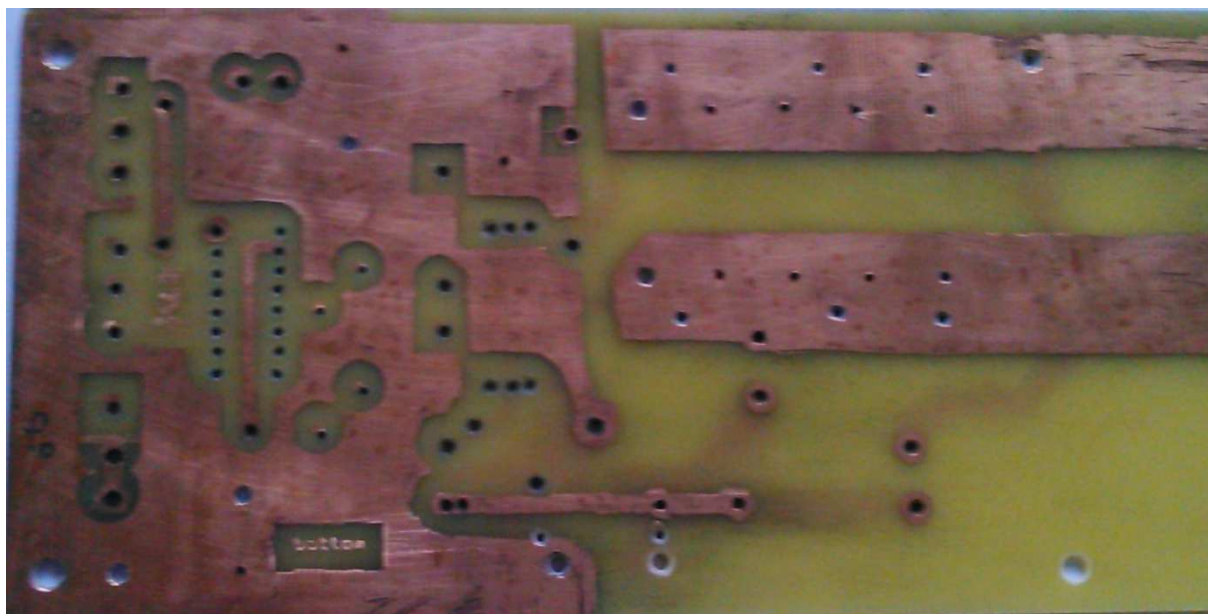
4.5 Deska plošných spojů zapojení s SG3524

Za základní substrát pro zhotovení desky plošných spojů byl zvolen v současné době nejpoužívanější průmyslový standard FR4 (skelná tkanina vytvrzená epoxidovou pryskyřicí) tloušťky 1,2 mm. Na tento materiál výrobce naplátoval 18 μm měděné vrstvy z obou stran. Deska plošného spoje byla nejprve oříznuta do požadované velikosti a následně byly hrany povrchově upraveny smirkovým papírem o hrubosti 400 a 1000 (práce s hrubostí 1000 proběhla pod vodou). Obrazec plošných spojů vygenerovaný z návrhového programu (nachází se v příloze A) se na speciální fólii [20] vytiskl tonerem z laserové tiskárny. K přenosu obrazce z fólie na desku plošných spojů dochází za působení vhodné kombinace teploty a tlaku vytvořené klasickou žehličkou. Deska plošných spojů musí být před samotným nanesením řádně očištěna. Protože bylo zapotřebí přenést obě vrstvy, bylo po nanesení první vrstvy (strana top) vyvrtáno několik děr pro sesouhlasení obrazců. Následně po odlepení fólie a snížení teploty se stejný postup opakoval na straně vodivých cest bottom. Po úspěšném

přenesení obrazců z folií na obě strany DPS bylo provedeno vrtání základním rozměrem vrtáku o průměru 0,9 mm. V místech pro výkonové součástky a potenciometry byl pro otvory použit vrták o průměru 1,2 mm. Protože část prokovů tvoří šroubky, matice a vějířové podložky o rozměru 2 mm musely být vybrané otvory převrtány na větší průměr (2 mm). Po kontrole DPS přišlo na řadu retušování okolo děr, prokovů a míst kde se obrazec nepřenesl dokonale. U této druhé verze však k fatálním chybám během procesu nedošlo a proto retuše prováděná speciálním fixem na lihové bázi proběhla relativně rychle. Rozměrová chyba sesouhlasení motivů byla v nejhorším případě okolo 1 mm s čímž se ovšem při návrhu DPS počítalo, proto všechny motivy jsou v toleranci. Následně proběhl proces leptání v roztoku chloridu železitého. Leptání oboustranné DPS v domácích podmínkách dopadlo úspěšně, což dokazují obrázky 34 a 35 umístěné níže. Po optické kontrole DPS byl toner chránicí měď před odleptáním odstraněn chemicky nitroředidlem a pak byla deska ještě ošetřena technickým lihem, aby se odstranila barva i z otvorů pro THT součástky.



Obrázek 34. Zhotovená DPS (strana top)



Obrázek 35. Zhotovená DPS (strana bottom)

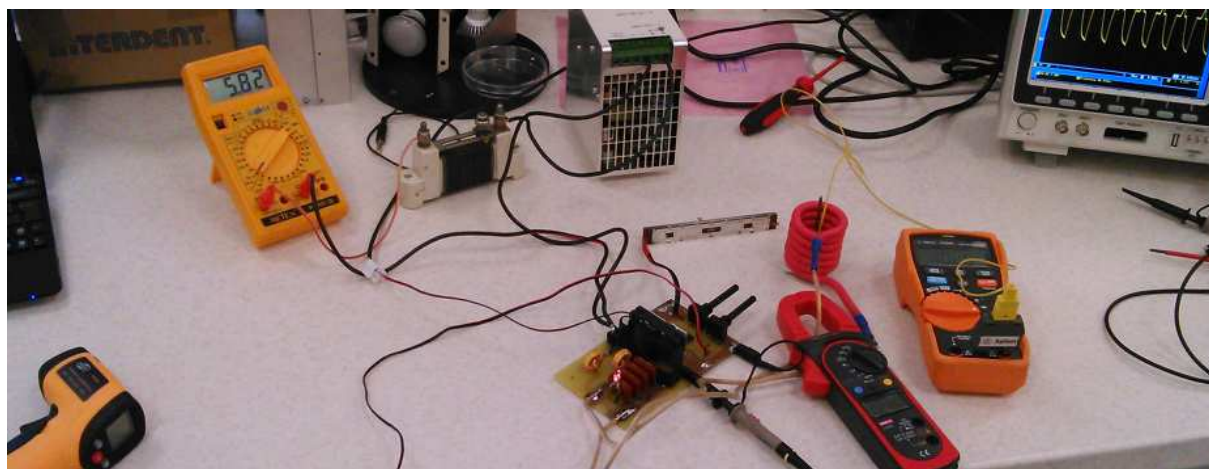
Vyčištěná a vysušená DPS byla postupně osazována součástkami. Nejprve byly zhotoveny prokovy pomocí již zmíněných šroubků M2, matic a vějířových podložek zaručujících vodivé propojení obou stran plošného spoje. Zbývající prokovy byly vytvořeny pomocí zapájení pájky a drátku o příslušném průměru. Následně proběhlo osazení a zapájení SMD součástek a integrovaného obvodu SG3524. Po ověření správnosti pájení a osazení proběhlo kontrolní měření na osciloskopu (obrázky 28 – 30). Dále se pak osadily výkonové tranzistory IGBT s hliníkovým chladičem. Poté došlo na zapájení ostatních vývodových součástek a také vlastní cívky, která se nachází na přívodních vodičích, aby byla možnost manipulace s modulem ohřevu a místem určeným pro ohřev (6 závitů). Veškeré pájení probíhalo ručním neregulovatelným pájedlem s uzemněným hrotem a slitinou pájky Sn60Pb40. Toto zapojení tudíž nesplňuje moderní ekologické požadavky jako PbFree. Z hlediska vývoje a případných změn některých hodnot součástek je však volba olovnaté pájky jednoznačně lepší než pájení slitinou SAC. Ve funkci přídavného tavidla posloužila kalafuna. V další kapitole je popsán průběh měření a ověřování funkce tohoto zapojení modulu ohřevu.

4.6 Měření

Během měření bylo využito několik měřících přístrojů a jiných zařízení, bez kterých by nebylo možné dosáhnout uspokojivých výsledků. Kromě již zmíněných zařízení v textu je důležitou součástí napájecí zdroj. Přístroje, se kterými byla prováděna měření:

- Laboratorní zdroj Diametral L240R51D
- Osciloskop Rigol DS1022CD
- Multimetr Rigol DM3051
- **Multimetr ruční Metex M-3800**
- Multimetr ruční Ben DT-830D+
- Zdroj 12 V / 8,5 A GM S-100-12
- **Bezdrátový teploměr Benetech GM300**
- Multimetr ruční Agilent U1732A (LCR metr)
- **Multimetr ruční Agilent U1233A (s termočlánkem typu K)**
- **Klešťový ruční multimetr UM-T UT203**
- Osciloskop GWINSTEK GDS-2102A
- **Zdroj 24 V / 20 A Schneider Electric ABL4RSM24200**
- **Reostat 0,5 – 2,2 Ω**
- Analogový V-A metr U4352 B4.1

Při laboratorním měření, jak je zdokumentováno na obrázcích 36 až 39, byla použita tučně zvýrazněná zařízení.



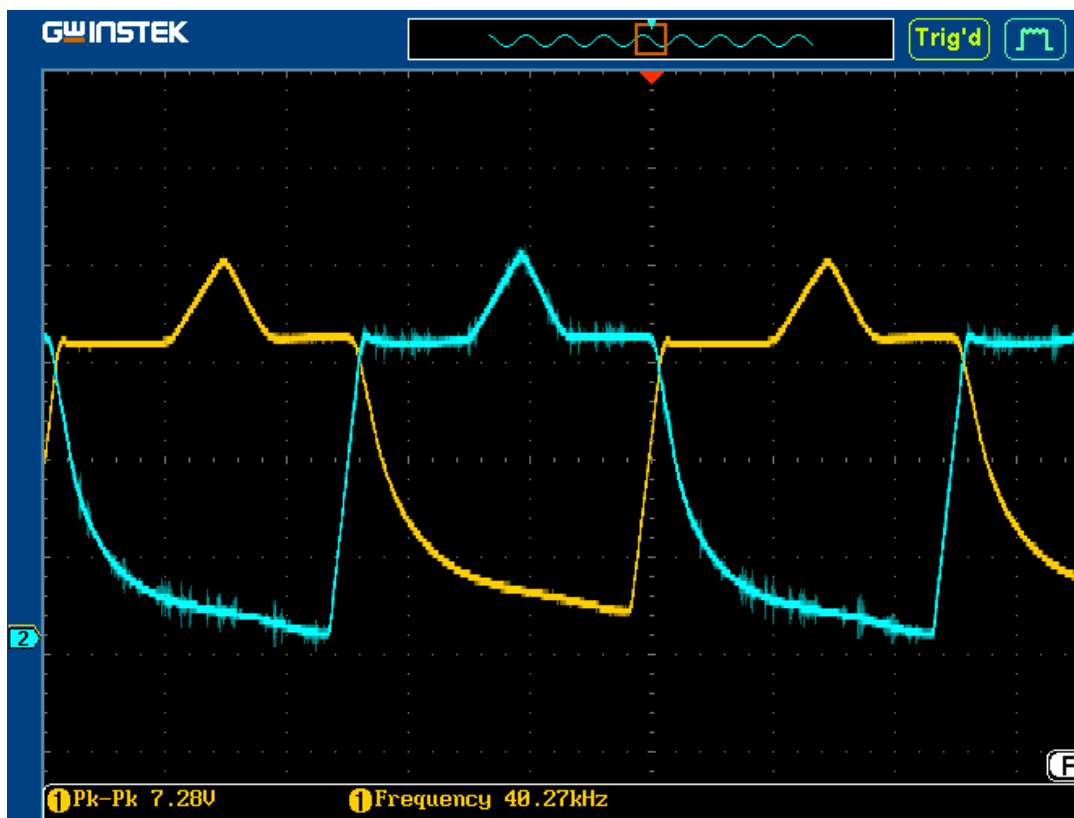
Obrázek 36. Uspořádání pracoviště pro měření modulu ohřevu



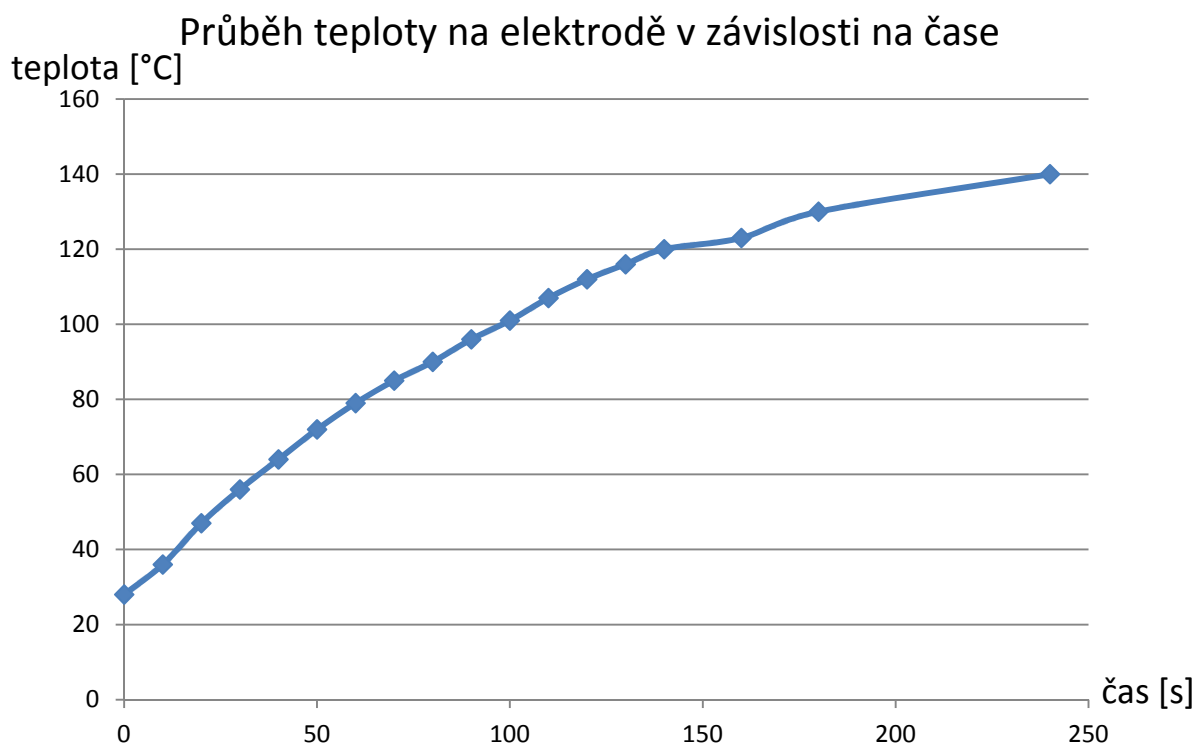
Obrázek 37. Detail měření (střídavý proud $I_{PRO}=20$ A, teplota $T=150$ °C)

Při měření byl zapojen zdroj napětí 24 V sériově s reostatem omezujícím proud a sériově s multimetrem Metex, který měřil stejnosměrný proud modulu ohřevu. Proud tekoucí rezonančním obvodem měřil klešťový ampérmetr. Jeho hodnota při rezonanci byla naměřena 24,4 A. Napětí při rezonanci bylo 17,7 V. Napájecí proud byl 5,63 A. Rezonanční frekvence zjištěná pomocí osciloskopu měla hodnotu 40,27 kHz. Průběhy řídicích napětí U_{G1} a U_{G2} zobrazuje obrázek 38. Je zřejmé, že se od prvotních osciloskopických měření získaných bez rezonanční zátěže liší. Aktualizované průběhy naznačují, že by bylo vhodné zvýšením kapacity CT (také zvýšením RT, aby byla zachována rezonanční frekvence f_0) zvýšit hodnotu doby zpoždění (t_d). K odstranění přesahu signálů může dojít také snížením střídavé šířkové modulace (regulací potenciometru označeném ve schématu jako R7).

Měření teploty začalo na počáteční hodnotě 28 °C a trvalo 4 minuty. Během doby provozu byly v pravidelných intervalech zapisovány hodnoty teploty, ze kterých byl poté vytvořen graf (Obrázek 39). Naměřené hodnoty se nacházejí v tabulce 3. Měření teploty bylo zajištěno termočlánkem typu K a kalibrovaným měřidlem Agilent U1233A .



Obrázek 38. Průběhy řídicích napětí na tranzistorech IGBT (Napětí U_{G1} a U_{G2})



Obrázek 39. Průběh nárůstu teploty

Tabulka 3. Naměřené hodnoty (doba ohřevu 4 minuty)

čas [s]	teplota [°C]
0	28
10	36
20	47
30	56
40	64
50	72
60	79
70	85
80	90
90	96
100	101
110	107
120	112
130	116
140	120
160	123
180	130
240	140

Příkon (součin napájecího napětí a procházejícího proudu) vychází podle naměřených a nastavených hodnot na 131 W. Pro dosažení finální teploty na trysce 300 °C by modul ohřevu v tomto laboratorním zapojení musel být zapojen teoreticky přes 10 minut. V případě, že bude z napájecí cesty odstraněn reostat, dojde k zvýšení výkonu celého modulu. Příkon se zvýší přibližně trojnásobně a v závislosti na tom vzrostou i proudy a napětí rezonančního obvodu. Dochází pak k rychlejšímu ohřevu, ale i většímu teplotnímu namáhání součástek. Při použití malých hliníkových chladičů pro pouzdra tranzistorů TO220 je nutné využít aktivní chlazení, aby nedošlo k destrukci tranzistorů. U tohoto typu IGBT tranzistoru výrobce udává maximální teplotu pouzdra 180 °C. Pasivní chlazení by bylo také možné, ale velikost jednoho chladiče tranzistoru překoná rozměry osazené DPS (aby byl splněn příslušný teplotní koeficient max. 1,2 °C / W). Automatická regulace chladícího ventilátoru nebyla prozatím řešena.

4.7 Další návrhy zapojení pro modul ohřevu

Během realizace modulu ohřevu bylo vytvořeno několik dalších zapojení indukčního ohřevu. V první řadě bylo zapojení téměř shodné s již popsaným zapojením s SG3524. V zapojení se nacházel jiný časovací kondenzátor o hodnotě 4,7 nF a jiná pracovní cívka (předpokládaná indukčnost po vložení trysky je vyšší než 15 μH). Ta byla pro zvýšení efektivity a indukčnosti zhotovena o celkem dvaceti závitěch. Výkonové tranzistory byly použity unipolární tranzistory typu N IRFZ44N [21]. Při měření, po naladění rezonanční frekvence, se na rezonančním obvodu naměřilo napětí kolem 50 V. Ohřev byl velmi efektivní. Během méně než jedné minuty došlo k překonání teploty varu (100 °C), která byla nakápnuta na šroub s maticemi, demonstrující elektrozvlákňovací trysku (došlo k odpaření vody). Měření teploty elektrody bezdrátovým teploměrem se ukázalo jako velmi nepřesné (vzhledem k ploše měřené plochy a měřícími schopnostmi zakoupeného teploměru Benetech). Celkový příkon modulu ohřevu byl výpočtem určen na 368 W. Některá další realizovaná zapojení jsou popsány níže v samostatných kapitolách. Výroba DPS probíhala obdobně jako v popsaném případě v kapitole 4.5, ovšem jen jako jednovrstvé plošné spoje, proto byla jejich výroba nepatrně jednodušší.

4.7.1 Schéma zapojení s IR2153

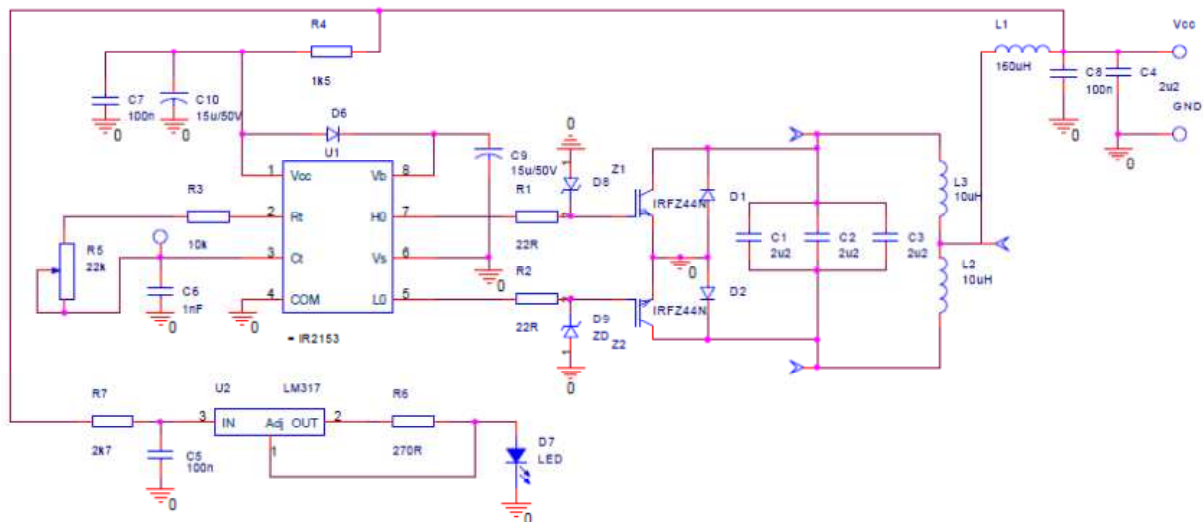
Schéma zapojení s integrovaným obvodem IR2153 vychází z doporučeného zapojení převzaté z katalogového listu a je zobrazeno na obrázku 40. Základem časové základny je kondenzátor C5 o hodnotě 1 nF a sériová kombinace R3 (10 k Ω) a potenciometru R5 (22 k Ω). Výstupní výkonové tranzistory byly zvoleny IRFZ44N (ovšem je možné použít i typ IGBT na který je integrovaný obvod připraven). Naznačené diody D1 a D2 opět nebyly osazeny, protože jsou již integrovány v pouzdru tranzistoru. Ochranné zenerovy diody nebyly prozatím také osazeny. Bylo zjištěno, že příkon je velmi malý a k ohřevu dochází velmi pomalu (5 W). Toto zapojení by bylo vhodné vylepšit změnou L1 za menší indukčnost. Pak dojde k nárůstu výkonu procházející rezonančním obvodem a tím i zvýšení rychlosti ohřevu elektrody. Napájecí napětí bylo stejnosměrné o hodnotě 24 V.

Obrázek 41 zobrazuje výstupní průběh na rezonančním obvodu při naladění rezonanční frekvence. Pracovní cívka měla 10 závitů, ale vnitřní průměr byl nastaven na 70 mm. Měření pomocí LCR metru ukázalo hodnotu indukčnosti 5,5 μH bez jádra. Měřicí frekvence byla 10 kHz. Při vložení železného jádra tato indukčnost vzroste o několik desetin až jednotek μH . Během měření a ladění byla nalezena i rezonance sériového rezonančního

4.7.2 Schéma zapojení s IR2153 v2

Další zapojení s využitím tohoto řídicího obvodu se nachází na obrázku 42. Toto schéma bylo inspirované zapojením rezonančního článku, dostupném na internetových stránkách [22]. V zapojení se nachází stejné časovací hodnoty CT a RT jako v předchozím případě, ale zapojení výstupů je rozdílné. Výkonové tranzistory jsou řízeny v konfiguraci push-pull. Proud ze zdroje nesymetrického stejnosměrného napětí pak prochází tlumivkou L1 a podle aktuálně otevřeného tranzistoru také polovinou pracovní cívky. Ta byla zhotovena z měděného drátu o průřezu 10 mm². Její parametry jsou 11 + 10 závitů. Odhadovaná indukčnost poloviny pracovní cívky je 10 μH. Jako v předešlých případech nebyly při využití unipolárních tranzistorů IRFZ44N zapojeny diody D1 a D2.

Při měření byl využit 24 V zdroj, který dodával obvodu stejnosměrný proud o hodnotě 16 A. Příkon tedy vychází 384 W. Ohřívaná tryska se nachází na obrázku 43. Během měření došlo k rychlému ohřevu trysky, kde indikací mezní hodnoty 100 °C bylo opět malé množství vody. Tato doba byla kratší než jedna minuta. Realizace pro finální modul této dvojité pracovní cívky se jeví jako složitá. Parametry ohřevu jsou ale velmi uspokojující. Schéma a obrazec desky plošných spojů se nachází v příloze C.



Obrázek 42. Schéma zapojení s IR2153 a dvojitou pracovní cívkou



Obrázek 43. Ukázka praktické realizace dvojité cívky pro indukční ohřev

4.7.3 Rozšíření funkce obvodu s IR2153

Protože integrovaný obvod IR2153 disponuje fixní střídou signálu 50 %, bylo by vhodné mít možnost regulovat běh modulu ohřevu. Na to je od výrobce uzpůsoben přivedením nulového potenciálu na pin 3 (shodný s časovacím kondenzátorem C5). Výrobce doporučuje toto zapojení provést přes unipolární tranzistor. Ten může být řízen jednoduše mechanickým spínačem (pro zapnutí a vypnutí) nebo realizací časovače získaného vhodným zapojením obvodu NE556 (dvojitý časovač NE555). Toto zapojení by mohlo vycházet z odborné publikace nakladatelství BEN od Jana Hájka „2 x časovač 555 – praktická zapojení“.

Případně by běh modulu ohřevu mohla řídit přímo logika přístroje 4SPIN. Ideálně pokud bude vyřešeno dostatečně přesné snímání teploty elektrody a tím bude ve zpětné vazbě aktuální teplota trysky fungovat pro regulaci nastavené teploty elektrozvláknovací trysky.

5 Závěr

Během vytváření diplomové práce modulu ohřevu pro elektrovlákňovací elektrodu bylo studováno a principiálně navrženo několik možných řešení vhodných pro vysoké elektrostatické pole, které je při zvlákňování z taveniny přítomno.

Laserový ohřev, který se jeví jako velmi vhodný pro danou aplikaci, byl z bezpečnostních, finančních a konstrukčních důvodů zavrhnut. Mezi jeho výhody ovšem patří vysoká teoretická účinnost ohřevu, jelikož není třeba ohřívat celou trysku, ale jen daný polymerní materiál (granulát o váze maximálně jednotek gramů), umístěný v horní části trysky.

Indukční ohřev, který byl v několika různých modifikacích realizován, částečně splňuje zadání. Teoretické hodnoty rezonanční frekvence byly nejprve vypočteny, poté simulovány v PSpice prostředí a následně se tato frekvence ověřila prakticky získáním maximálního napětí na PRO. Maximální teplota trysky ovšem nebyla ještě prakticky ověřena. Samotná regulace ohřevu (výkonu) bude ve spolupráci s řízením laboratorního přístroje 4SPIN. Ten by měl zahrnovat i měření teploty a následně zpětnou vazbu pro modul ohřevu elektrovlákňovací elektrody. Nejvyšší naměřená hodnota teploty byla 151 °C (kalibrovaným měřidlem s termočlánkem typu K umístěným na ohřívané trysce) a to zapojením s SG3524. S tímto zapojením bylo po záměně pracovní cívky o celkem dvaceti závitech dosaženo vyšší rychlosti ohřevu, než při použití cívky se šesti závity. Výkonové tranzistory byly osazeny IRFZ44N. Nejvyšší teplota ovšem nemohla být aktuálně dostupnými prostředky změřena (bylo dosaženo varu malého množství vody do jedné minuty).

Výsledky ohřevu zapojení popsaného v kapitole 4.7.2 potvrdily také vysokou účinnost ohřevu, ovšem realizace dvojité pracovní cívky je mnohem složitější a pro danou aplikaci ve vysokém elektrostatickém poli i méně vhodná.

Výsledná realizovaná DPS zhotovená profesionálním výrobcem bude vycházet z některého z uvedených zapojení s některými změnami. Průběh diplomové práce ukázal, že bude třeba optimalizovat tloušťky vodivých cest rezonančního obvodu, kde procházejí řádově desítky A. Dále bude vhodné navýšení jednotlivých izolačních vzdáleností na desce plošných spojů. Také bude podstatné pro správnou funkci systému ohřevu vyřešit bezdrátové snímání teploty a odvod ztrátového tepla z chladičů tranzistorů při implementaci do přístroje 4SPIN®.

6 Seznam použité literatury

- [1] Stránky 4SPIN (snímek nanovláknenného materiálu elektronovým mikroskopem)
<http://www.4spin.info/images/MATERIALS/POLYCAPROLACTONE.jpg> [online 22.5.2014]
- [2] Ing. Marek Pokorný, Ph.D, Příprava a užití nanovláken jako systému pro řízené uvolňování léčiv (interní dokument firmy Contipro)
- [3] Překlad odborného článku:
Polymer 51 (2010) 2383e2389 Orientation analysis of individual electrospun PE nanofibers by transmission
- [4] Překlad odborného článku:
Melt Electrospinning System Equipped with a Line-like laser beam melting device
- [5] Učební text pro doktorské studium, převzato z internetu
http://www.bionanotech.cz/files/2012_modul_3/3_finalni_text.pdf [online 24.11.2013]
- [6] Základy termodynamiky (text pro učitele středních škol), převzato z internetu
http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/td/td_teach.pdf [online 13.11.2013]
- [7] Šíření tepla (prezentace), převzato z internetu
http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzika_I/sireni_tepla_MMF.pdf [online 13.11.2013]
- [8] RNDr. Olga Kapičková, CSc., Prof. František Vodák, DrSc., Skripta Termodynamika ISBN 80-01-03418-6
- [9] Ing. Jana Drbohlavová, PhD., Ing. Jan Prášek, PhD. Skripta Mikrosenzory a mikrotechnické systémy
- [10] Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc., Prof. Ing. Stanislav Ďaďo, DrSc., Doc. Ing. Marcel Kreidl, CSc., Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D. Skripta Senzory a převodníky ISBN 978-80-01-04696-8
- [11] Průběh spektrální intenzity vyzařování černého tělesa, převzato z internetu
http://www.qtest.cz/bezdotykoveteplomery/img/principmereni/teorie_fig03.gif [online: 9.12.2013]

[12] Thermopile, převzato z internetu

http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=9149 [online: 9.12.2013]

[13] Modul IR laseru, převzato z internetu

<http://laser-shop.cz/cs/do-vnitnich-prostor/207-focusable-24w-808nm-infrared-laser-diode-modul.html> [online 7.11.2013]

[14] Katalogový list součástky NE555, převzato z internetu

<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/161279/TI/NE555.html> [online 15.12.2013]

[15] Ing. Zdeněk Faktor CSc., Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje
ISBN 80-86056-91-0

[16] Katalogový list součástky IR2153, převzato z internetu

<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68074/IRF/IR2153.html> [online 29.12.2013]

[17] Katalogový list součástky SG3524, převzato z internetu

<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/27318/TI/SG3524.html> [online 12.2.2014]

[18] Schéma indukčního ohřevu, převzato z internetu

http://markobakula.files.wordpress.com/2012/10/royer_ih.png [online 15.2.2014]

[19] Katalogový list součástky IRG4BC30UD, převzato z internetu

<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68665/IRF/IRG4BC30UD.html>

[online 28.12.2013]

[20] Fólie pro výrobu desek plošných spojů (DPS, PCB), převzato z internetu

<http://www.ges.cz/cz/fpcb-bl-GES07700242.html> [online 1.5.2014]

[21] Katalogový list součástky IRFZ44N, převzato z internetu

<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/68619/IRF/IRFZ44N.html> [9.3.2014]

[22] Schéma indukčního ohřevu, převzato z internetu

<http://forum.allaboutcircuits.com/cache.php?url=http://diymania.hv4all.com/zvs%20ih.PNG>

[online 15.2.2014]

7 Seznam příloh

Příloha A	Schéma a DPS zapojení s SG3524
Příloha B	Schéma a DPS zapojení s IR2153
Příloha C	Schéma a DPS zapojení s IR2153 s dvojitou pracovní cívkou
Příloha D	Katalogový list součástky IR2153
Příloha E	Katalogový list součástky SG3524
Příloha F	Katalogový list součástky IRG4BC30UD
Příloha G	Katalogový list součástky IRFZ44N